

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Hrvoje Jaklenec**

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Šitum

Student:

Hrvoje Jaklenec

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru Prof. dr. sc. Željku Šitumu što mi je omogućio izradu diplomskog rada, te na pruženoj stručnoj pomoći, potpori i razumijevanju tokom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se gospodinu Andreju Drozgu iz tvrtke National Instruments na posuđenom uređaju CompactRIO i odgovarajućim modulima, te Prof. dr.sc. Zoranu Luliću na posuđenom modulu NI 9401.

I na kraju, zahvaljujem se svojoj obitelji na strpljenju, moralnoj podršci i povjerenju koje su mi ukazali za vrijeme studija.

Hrvoje Jaklenec

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VII
1. UVOD.....	1
2. TEHNIČKI OPIS LABORATORIJSKOG SUSTAVA .....	4
2.1. Upravljanje na principu prigušenja .....	7
2.2. Upravljanje na principu promjene količine protoka radnog fluida .....	8
2.3. Elementi sustava .....	9
2.3.1. Energetski dio sustava.....	9
2.3.2. Upravljački dio sustava .....	13
2.3.3. Izvršni dio sustava.....	16
2.3.4. Mjerni dio sustava.....	17
2.3.5. Upravljačko računalo i upravljački uređaj CompactRIO .....	19
3. MATEMATIČKI MODEL.....	25
3.1. Upravljanje na principu prigušenja .....	26
3.1.1. Nelinearni model.....	26
3.1.2. Linearizirani model .....	28
3.2. Upravljanje na principu promjene količine protoka radnog fluida .....	31
4. SIMULACIJSKI MODEL.....	35
4.1. LabVIEW programski paket .....	35
4.2. Izrada simulacije .....	39
5. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE .....	45
5.1. Izrada upravljačkog programa .....	46
5.2. Eksperimentalni rezultati .....	53
6. ZAKLJUČAK.....	56
LITERATURA.....	57

## POPIS SLIKA

Slika 2.1	Modul rotacijskog elektro-hidrauličkog servo sustava .....	4
Slika 2.2	Shema elektro-hidrauličkog servo sustava .....	6
Slika 2.3	Upravljanje na principu prigušenja .....	7
Slika 2.4	Upravljanje na principu promjene količine protoka radnog fluida .....	8
Slika 2.5	Hidraulička crpka <i>ViVoil XV-1P</i> .....	9
Slika 2.6	Elektromotor <i>Siemens 1LA7</i> .....	10
Slika 2.7	Ovisnost napona i momenta o porastu frekvencije .....	11
Slika 2.8	Frekvencijski pretvarač <i>Siemens Sinamics G-110</i> .....	12
Slika 2.9	Proporcionalni tlačni ventil <i>Atos RZMO</i> .....	14
Slika 2.10	Servo ventil <i>Schneider Kreuznach HVM 061</i> .....	14
Slika 2.11	Elektromagnetski ventil <i>Atos DHI-0 63</i> .....	15
Slika 2.12	Hidromotor <i>Hansa Flex LöSi HK-EPMM</i> .....	16
Slika 2.13	Gerotor motor .....	17
Slika 2.14	Princip rada inkrementalnog enkodera .....	18
Slika 2.15	Inkrementalni enkoder <i>Heidenhein ERN 120</i> .....	18
Slika 2.16	Senzor tlaka <i>Siemens Sitrans P serije Z</i> .....	19
Slika 2.17	Glavne komponente uređaja <i>CompactRIO</i> .....	20
Slika 2.18	Upravljački uređaj <i>NI CompactRIO 9076</i> .....	21
Slika 2.19	Analogni ulazni modul <i>NI 9221</i> .....	22
Slika 2.20	Analogni izlazni modul <i>NI 9263</i> .....	23
Slika 2.21	Digitalni izlazni modul <i>NI 9474</i> .....	23
Slika 2.22	Digitalni ulazni modul <i>NI 9401</i> .....	24
Slika 4.1	Primjer prednje ploče .....	36
Slika 4.2	Primjer blok dijagrama .....	37
Slika 4.3	Početni izbornik LabVIEW-a .....	39
Slika 4.4	Izbornik projekta .....	40
Slika 4.5	Blok dijagram prijenosne funkcije .....	41
Slika 4.6	Parametri prijenosne funkcije .....	41
Slika 4.7	Simulacijska petlja .....	42
Slika 4.8	Blok dijagram simulacije sustava .....	42

Slika 4.9	Parametri simulacijske petlje.....	43
Slika 4.10	Grafičko sučelje simulacijskog modela.....	44
Slika 4.11	Odziv simulacijskog sustava .....	44
Slika 5.1	Principijelna blok shema sustava .....	45
Slika 5.2	Blok dijagram upravljačkog programa.....	46
Slika 5.3	Korisničko sučelje upravljačkog programa.....	46
Slika 5.4	Dodavanje upravljačkog uređaja CompactRIO.....	47
Slika 5.5	Vremenska <i>While</i> petlja s <i>PID</i> blokovima .....	48
Slika 5.6	Regulacijska petlja .....	50
Slika 5.7	Dodavanje vremenskih ograničenja .....	50
Slika 5.8	Spajanje senzora tlaka .....	51
Slika 5.9	Dodavanje tipki za aktiviranje i deaktiviranje različitih razina kôda.....	52
Slika 5.10	Dodatni grafovi.....	52
Slika 5.11	Grafičko sučelje s odzivima .....	53
Slika 5.12	Odziv brzine vrtnje.....	54
Slika 5.13	Izlazni signal iz regulatora .....	54
Slika 5.14	Ponašanje tlakova u ovisnosti o opterećenju.....	55

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1.	Parametri simulacijskog modela .....	39
Tablica 2.	Referentne vrijednosti brzine vrtnje i vremena.....	49
Tablica 3.	Parametri regulatora.....	49

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$B$	Pa	Modul stišljivosti fluida
$b_m$	Ns/m	Koeficijent prigušenja tereta
$C_d$		Koeficijent istjecanja servo ventila
$C_{im}$	$m^4/kg\ s$	Koeficijent unutarnjeg istjecanja motora
$C_{ip}$	$m^4/kg\ s$	Koeficijent unutarnjeg istjecanja crpke
$C_{it}$	$m^4/kg\ s$	Ukupni koeficijent unutarnjeg istjecanja
$C_{em}$	$m^4/kg\ s$	Koeficijent vanjskog istjecanja motora
$C_{ep}$	$m^4/kg\ s$	Koeficijent vanjskog istjecanja crpke
$C_{et}$	$m^4/kg\ s$	Ukupni koeficijent vanjskog istjecanja
$C_t$	$m^4/kg\ s$	Ukupni koeficijent istjecanja
$c_m$	N/m	Koeficijent elastičnosti tereta
$d_v$	m	Promjer klipa servo ventila
$f_{ip}$	Hz	Izlazna frekvencija frekvencijskog pretvarača
$f_{em}$	Hz	Frekvencija ulaznog napona elektromotora
$i$	A	Struja
$I_{em}$	A	Nazivna struja elektromotora
$J$	$kg\ m^2$	Ukupni moment inercije
$J_m$	$kg\ m^2$	Moment inercije motora
$J_t$	$kg\ m^2$	Moment inercije tereta
$K_{1m}$	$(m^3/s)/Pa$	Koeficijent otjecanja hidromotora
$K_c$	$(m^3/s)/Pa$	Koeficijent otjecanja servo ventila
$K_{ce}$	$(m^3/s)/Pa$	Ukupni koeficijent otjecanja hidromotora
$K_{ps}$	okr/V	Koeficijent pojačanja pogonskog sklopa
$K_q$	$(m^3/s)/m$	Koeficijent pojačanja protoka servo ventila
$K_r$	A/V	Koeficijent pojačanja regulatora
$K_v$	m/A	Koeficijent pojačanja servo ventila
$m$	kg	Masa elektromotora
$M_v$	Nm	Vanjski moment opterećenja
$n_{em}$	okr/min	Broj okretaja elektromotora
$n_m$	okr/min	Broj okretaja hidromotora
$p_1, p_2$	Pa	Tlakovi suprotnih strana hidromotora
$p_a$	Pa	Tlak rezervoara
$p_{b,max}$	Pa	Maksimalni tlak servo ventila
$P_{em}$	kW	Snaga elektromotora



$p_L$	Pa	Korisni pad tlaka
$p_N$	Pa	Nazivni pad tlaka servo ventila
$p_{P,max}$	Pa	Maksimalni tlak tlačnog voda proporcionalnog ventila
$p_{R,max}$	Pa	Maksimalni regulirani tlak proporcionalnog ventila
$p_{R,min}$	Pa	Minimalni regulirani tlak proporcionalnog ventila
$p_s$	Pa	Tlak napajanja
$p_{T,max}$	Pa	Maksimalni tlak povratnog voda proporcionalnog ventila
$Q_1$	m <sup>3</sup> /s	Protok kroz radnu komoru hidromotora
$Q_2$	m <sup>3</sup> /s	Protok kroz povratnu komoru hidromotora
$Q_L$	m <sup>3</sup> /s	Protok kroz servo ventil
$Q_m$	m <sup>3</sup> /s	Protok kroz hidromotor
$Q_{max}$	m <sup>3</sup> /s	Maksimalni protok kroz proporcionalni ventil
$Q_{min}$	m <sup>3</sup> /s	Minimalni protok kroz proporcionalni ventil
$q_{rm}$	m <sup>3</sup> /rad	Specifični protok hidromotora
$q_{rp}$	m <sup>3</sup> /rad	Specifični protok crpke
$Q_p$	m <sup>3</sup> /s	Protok kroz crpku
$t$	s	Vrijeme
$T_{ps}$	s	Vremenska konstanta pogonskog skopa
$T_v$	s	Vremenska konstanta servo ventila
$u_{fp}$	V	Napon na ulazu u frekvencijski pretvarač
$U_{em}$	V	Napon elektromotora
$V_0$	m <sup>3</sup>	Poluvolumen hidromotora
$V_1$	m <sup>3</sup>	Volumen radne komore hidromotora
$V_2$	m <sup>3</sup>	Volumen povratne komore hidromotora
$V_c$	m <sup>3</sup>	Radni volumen crpke
$V_t$	m <sup>3</sup>	Ukupni radni volumen radnog fluida (pod tlakom)
$w$	m <sup>2</sup>	Gradijent otvora servo ventila
$y_v$	m	Pomak klipa servo ventila
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća radnog fluida
$\zeta_h$		Koeficijent prigušenja hidromotora
$\Theta_m$	rad	Kut zakreta hidromotora
$\omega_{em}$	rad/s	Brzina vrtnje elektromotora
$\omega_h$	rad/s	Neprigušena vlastita frekvencija
$\omega_p$	rad/s	Brzina vrtnje crpke

## SAŽETAK

Tema ovog rada je regulacija brzine vrtnje hidrauličkog motora. Na zadanom hidrauličkom postavu moguća su dva načina regulacije brzine vrtnje. Prvi je regulacija na principu prigušenja gdje temeljnu ulogu ima servo ventil koji prigušuje radni fluid koji mu dobavlja crpka konstantnog protoka i na taj način određuje protok radnog fluida prema hidromotoru. Drugi način je regulacija na principu promjene količine protoka radnog fluida. U tom slučaju izvršni član više nije servo ventil, nego pogonski sklop kojeg čine elektromotor i frekvencijski pretvarač. Preko frekvencijskog pretvarača se upravlja brzinom vrtnje elektromotora koji pogoni crpku te na taj način određuje protok koji crpka daje u sustav. Veća brzina vrtnje elektromotora znači veći protok koji crpka daje u sustav. U radu je dan matematički model za oba načina upravljanja, a eksperiment je proveden za regulaciju brzine vrtnje na principu promjene količine protoka radnog fluida.

Za regulaciju se koristi upravljački uređaj CompactRIO, koji izvršava kôd koji se izrađuje u programskom paketu LabVIEW. To je grafički programski jezik koji se najčešće koristi za vizualizaciju, testiranje, nadzor, prikupljanje i obradu podataka, te za upravljanje i regulaciju sustava. Programi izrađeni u LabVIEW-u se nazivaju virtualni instrumenti (VI), a sastoje se od grafičkog sučelja (Front panel) i blok dijagrama. Grafičko sučelje je ono što korisnik vidi pri radu sa sustavom, a u blok dijagramu se odvija programska obrada podataka. U radu je opisana izrada programa kojim se proveo eksperiment na zadanom elektro-hidrauličkom servo sustavu. Za interakciju korisnika i uređaja CompactRIO te nadzor rada elektro-hidrauličkog servo sustava koristi se prijenosno računalo.

Ključne riječi:

Elektro-hidraulika; servo sustav; regulacija; LabVIEW; CompactRIO

## 1. UVOD

U ovom radu će se razmatrati elektronički upravljani hidraulički motor koji koristi ulje kao radni medij. Takav sustav se naziva elektro-hidraulički servo sustav. Elektro-hidraulički servo sustavi posjeduju niz prednosti u odnosu na električne i hidrauličke sustave zasebno. U odnosu na klasičnu hidrauliku superiorni su kod upravljanja sustava jer su upravljački signali električni. Za razliku od hidrauličkih signala, električni signali su pogodni za pretvorbu, obradu, prijenos i spremanje. Dok je kod izvršnih elemenata hidraulika mnogo bolji izbor od elektronike. Razlog tome je što hidraulički aktuatori imaju manju masu i manje dimenzije od električnih aktuatora iste snage.

Elektro-hidraulički servo sustavi su sustavi koji omogućuju visoku točnost upravljanja velikim inercijskim teretima, velike brzine odziva i velika pojačanja snage. Ta svojstva je omogućio razvoj elektronike i njena integracija u hidrauličke sustave, što je dovelo do razvoja elektro-hidrauličkih razvodnika koji su osnovni elementi elektro-hidrauličkih servo sustava. Elektro-hidraulički razvodnici se mogu podijeliti na servo ventile i proporcionalne ventile. Cilj razvoja servo ventila je bio da se električnim signalima malih vrijednosti može jednostavno i točno upravljati velikim silama. Njihova prva primjena je bila u zrakoplovstvu i to ponajviše zbog vrlo visokih cijena te tehnologije. Daljnjim razvojem ta se tehnologija počela primjenjivati i u industrijskoj proizvodnji, što je dovelo do razvoja proporcionalnih ventila. Glavne odlike proporcionalnih ventila su fleksibilnost, preciznost, prijenos i obrada signala. Za povezivanje električnog i hidrauličkog dijela sustava, servo ventili koriste elektromehanički pretvarač, a proporcionalni ventili koriste proporcionalne magnete. Elektro-hidraulički razvodnici također služe i kao pojačalo snage s koeficijentom pojačanja do  $10^6$ .

Elektro-hidraulički servo sustavi imaju karakteristike koje ostali servo sustavi ne posjeduju. Omogućuju upravljanje velikih tereta s velikim opterećenjima, visokom točnošću i brzim odzivom sa velikih udaljenosti i sa malim snagama. Izlazne veličine sustava su najčešće mehaničke veličine, poput pomaka, sile i brzine ili hidrauličke, poput protoka i tlaka. Ulazni signali su strujni ili naponski. Servo sustav podrazumijeva povratnu vezu koja daje informaciju o stanju izlazne veličine. Da bi ta izlazna veličina mogla doći do računala koriste se senzori koji povratnom vezom šalju signal računalu gdje se oni obrađuju i na temelju njihove obrade, regulator preko objekta regulacije djeluje na proces.

Neke od prednosti elektro-hidrauličkih servo sustava su [1]:

- prijem i prijenos upravljačkih signala na velike udaljenosti žičanim ili daljinskim putem,
- jednostavno ostvarivanje povratne veze senzorima,
- lako mijenjanje pojačanja regulacijskog kruga,
- uključivanje elektro-hidrauličkih servo sustava kao izvršne elemente drugih sustava za automatsko upravljanje zbog mogućnosti prijema signala vrlo male snage na ulazu servo sustava,
- ostale vrste motora i strojeva ograničene su dozvoljenim zagrijavanjem, dok kod hidrauličkih komponenti to nije slučaj, jer radni medij preuzima generiranu toplinu i odnosi je od komponenata što omogućuje da hidrauličke komponente budu male i lagane,
- radni medij djeluje i kao mazivo te se na taj način dodatno produljuje životni vijek trajanja hidrauličkih komponenata,
- hidraulički aktuatori (motori i cilindri) imaju krute karakteristike momenta i veliku specifičnu snagu.

Glavni nedostaci elektro-hidrauličkih servo sustava su [1]:

- proizvodnja hidrauličkih komponenata zahtjeva vrlo uske tolerancije što rezultira visokom cijenom hidrauličkih komponenti,
- otežano je i ograničeno upravljanje ovakvim sustavima zbog nelinearnosti i promjenjivosti parametara unutar hidrauličkog i mehaničkog dijela sustava. Time je i otežano izvođenje točnog matematičkog modela sustava. Nelinearnost hidrauličkog dijela prouzročena je nelinearnom karakteristikom protoka fluida kroz razvodnik u zavisnosti od korisnog pada tlaka i pomaka klipa razvodnika,
- ovi sustavi nisu linearni, fleksibilni, precizni i jeftini kao električni i/ili elektromehanički uređaji kada se radi o upravljanju malim signalima (teretima),
- radni medij ili hidrauličko ulje tijekom rada postaje kontaminirano te sadrži čestice koje abrazivno djeluju na skupe hidrauličke komponente. Održavanje definira točno određen vremenski period nakon kojeg se mijenja ulje u sustavu, gdje se pojavljuje i problem odlaganja staroga ulja.

Zbog navedenih karakteristika, elektro-hidraulički servo sustavi su rasprostranjeni u raznim granama industrije, pogotovo kod manipulacije sa masama većim od 100 kg, numerički upravljanih alatnih strojeva, u automobilskoj industriji, kod civilnih i vojnih zrakoplova, kod autopilota na brodovima, građevinskim strojevima i vozilima, poljoprivredi, kemijskoj i procesnoj industriji te industriji čelika i papira [1].

## 2. TEHNIČKI OPIS LABORATORIJSKOG SUSTAVA

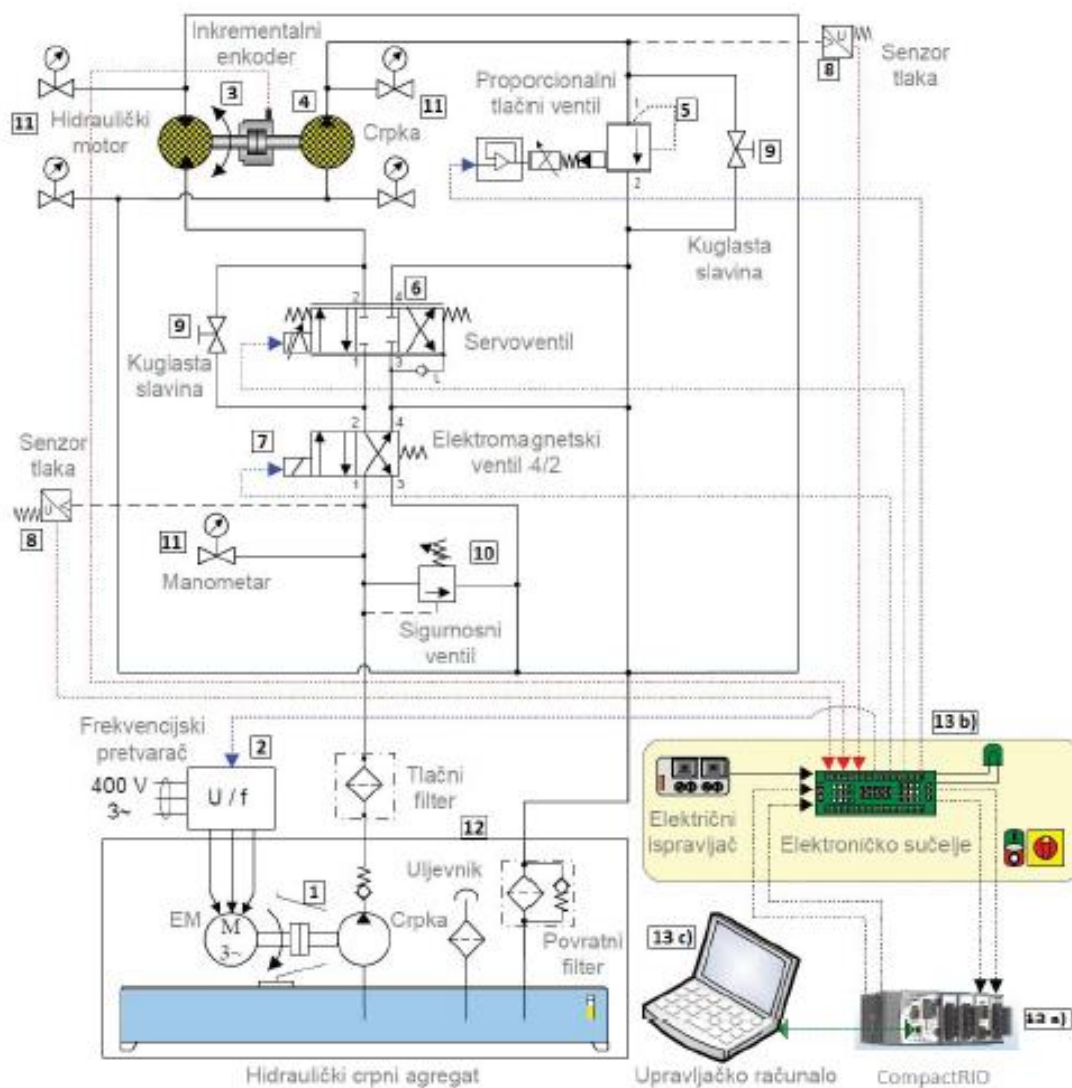
U radu se razmatra sustav za regulaciju brzine vrtnje hidrauličkog motora kao objekta upravljanja. Upravljanje je moguće izvesti pomoću servo ventila ili pomoću crpke i o vrsti izvedbe ovisi da li će izvršni član biti crpka ili servo ventil. Kao mjerni član se koristi inkrementalni enkoder, dok je regulacijski član uređaj CompactRIO. Slika 2.1 prikazuje fotografiju eksperimentalnog postava.



Slika 2.1 Modul rotacijskog elektro-hidrauličkog servo sustava

Na sljedećoj slici dan je prikaz elektro-hidrauličkog servo sustava koji se koristi u ovom radu, a sastoji se od sljedećih elemenata (Slika 2.2):

1. Hidraulička crpka pokretana trofaznim elektromotorom čiji ulazni napon je doveden sa frekvencijskog pretvarača.
2. Frekvencijski pretvarač koji radi u dva različita moda.
3. Hidraulički motor sa inkrementalnim enkoderom na izlaznom vratilu.
4. Dodatna hidraulička crpka čije je pogonsko vratilo pomoću spojke spojeno na izlazno vratilo hidrauličkog motora.
5. Proporcionalni tlačni ventil koji je spojen na izlaz dodatne hidrauličke crpke i u kombinaciji s njom oponaša teret.
6. Servoventil kojim se upravlja promjenom protoka prema hidrauličkom motoru.
7. Elektromagnetski ventil 4/2 koji služi kao osiguranje. Pomoću korisničkog sučelja na računalu, moguće je u slučaju nužde zaustaviti protok ulja kroz sustav.
8. Dva senzora tlaka koji služe za nadzor i proučavanje sustava u pogonu. Jedan na izlazu pogonske crpke i jedan na izlazu dodatne crpke.
9. Dvije kuglaste slavine koje služe kao premosnice za ulje ukoliko se ne koriste ventili s kojima su paralelno spojene.
10. Sigurnosni ventil koji služi kao zaštita od prevelikog tlaka ulja u sustavu.
11. Manometri koji služe za provjeru tlakova u sustavu.
12. Tri filtra ulja jer je vrlo opasno imati nečistoće u sustavu kada se koristi servo ventil.
13. Upravljački dio koji se sastoji od upravljačkog računala, elektroničkog sučelja i uređaja CompactRIO.

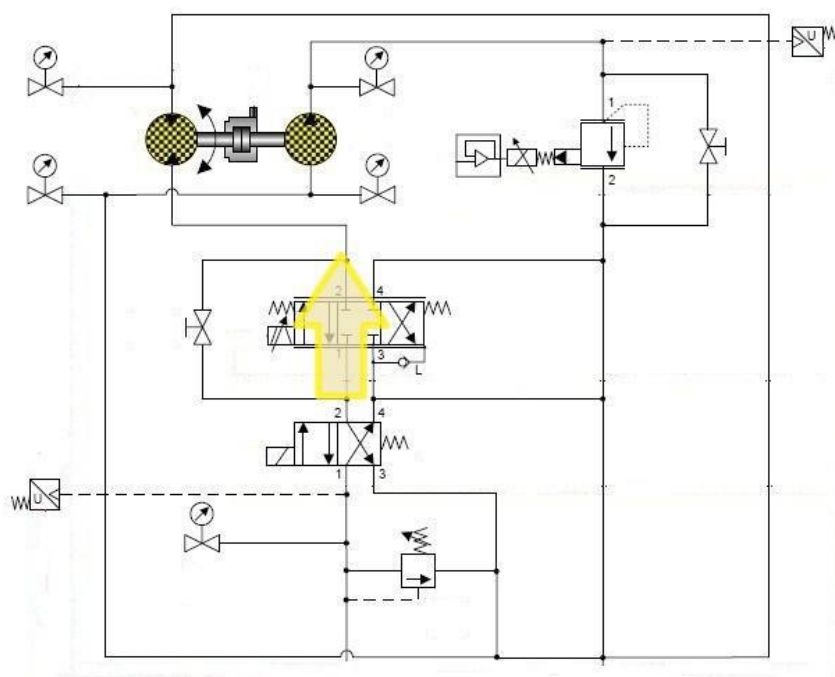


Slika 2.2 Shema elektro-hidrauličkog servo sustava



## 2.1. Upravljanje na principu prigušenja

Kao što je već navedeno, upravljanje brzinom vrtnje hidromotora u elektrohidrauličkom servo sustavu je moguće izvesti na dva načina. U ovom poglavlju je objašnjeno upravljanje na principu prigušenja. Da bi se omogućilo takvo upravljanje, kuglasta slavina koja je paralelno spojena sa servo ventilom mora biti zatvorena. Elektrohidraulički servoventil predstavlja izvršni član elektro-hidrauličkog servo sustava kod ovog načina upravljanja. Prolaz radnog fluida je prikazan na slici 2.3.

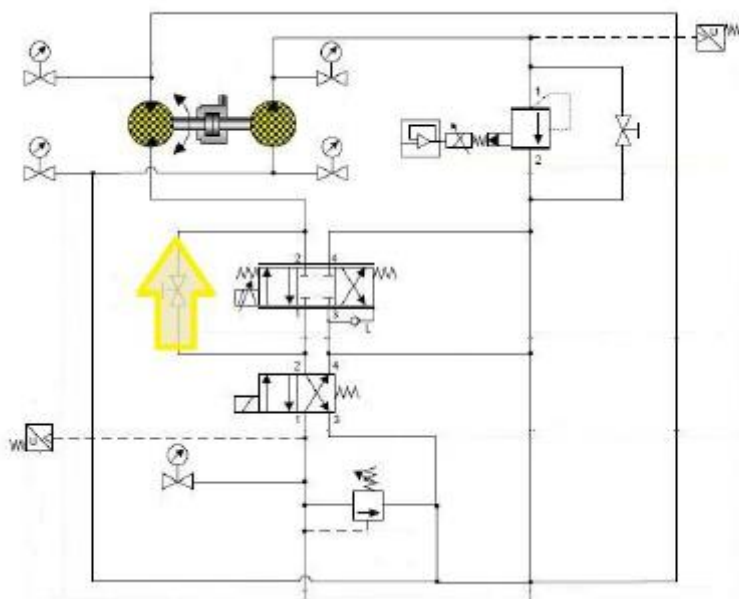


**Slika 2.3 Upravljanje na principu prigušenja**

U dinamičkom ponašanju hidrauličkog dijela sustava važna je dinamika elektrohidrauličkog servoventila. Njegova vrlo brza dinamika je ujedno i glavna prednost ovog načina upravljanja. Za napajanje servo ventila radnim fluidom najčešće se koristi crpka konstantnog specifičnog protoka. Uz visoku cijenu servo ventila, glavni nedostatak ovog načina upravljanja je to što se prigušenjem najveći dio energije pretvara u toplinsku energiju što dovodi do zagrijavanja fluida tako da je fluid potrebno hladiti dodatnim uređajem za hlađenje [2].

## 2.2. Upravljanje na principu promjene količine protoka radnog fluida

Kod ovog načina upravljanja otvaramo kuglastu slavinu koja je paralelno spojena sa servo ventilom tako da radni fluid više ne prolazi kroz servo ventil nego ide direktno prema hidromotoru. Na taj način brzinom vrtnje hidromotora upravljamo protokom koji daje hidraulička crpka. Za pogon crpke koristimo elektromotor. S obzirom da elektromotor ima konstantnu brzinu vrtnje, za upravljanje njegovom brzinom i radom koristimo frekvencijski pretvarač. On se preko elektroničkog sučelja povezuje sa upravljačkim računalom pomoću kojega upravljamo njegovim radom. Prednost ovakvog načina upravljanja je znatno niža cijena pretvarača u odnosu na servo ventil. Također, s obzirom da fluid slobodno prolazi kroz slavinu, ne dolazi do prigušenja fluida kroz servo ventil pa je rad sustava ekonomičniji jer imamo manje gubitke. Zbog inercije pogonskog elektromotora dinamika sustava je sporija nego kod upravljanja servoventilom, a to je ujedno i glavni nedostatak ovog načina upravljanja. Na slici 2.4 je prikazan protok radnog fluida kod ovog načina upravljanja.



**Slika 2.4 Upravljanje na principu promjene količine protoka radnog fluida**

## 2.3. Elementi sustava

### 2.3.1. Energetski dio sustava

#### Hidraulička crpka

Hidraulička crpka je uređaj koji dovedenu mehaničku energiju pretvara u energiju radnog fluida. Crpke se dijele u dvije osnovne kategorije: volumenske i dinamičke. Na eksperimentalnom postavu se koristi volumenska zupčasta crpka sa vanjskim ozubljenjem proizvođača ViVoil, tip XV-1P (Slika 2.5). Radna karakteristika volumenskih crpki je vrlo strma pa su opasne situacije kada je otpor iza crpke prevelik što može dovesti do oštećenja nekog od elemenata sustava. Da bi se to spriječilo, postavlja se ventil za ograničenje tlaka. Radni volumen crpke iznosi  $V_C = 4.9 \text{ cm}^3$ . Maksimalni protok crpke dobivamo prema sljedećem izrazu:

$$Q_{C,\max} = V_C \cdot n_{\text{em}} = 4.9 \cdot 10^{-6} \cdot 1420/60 = 1.16 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 6.96 \text{ l/min} \quad (2.1)$$



**Slika 2.5** Hidraulička crpka ViVoil XV-1P

## Elektromotor

Elektromotor se koristi za pogon hidrauličke crpke. Asinkroni elektromotor se sastoji od statora i rotora. Stator je izveden kao šuplji valjak od dinamo limova. Uzduž valjka, na unutarnjoj strani, nalaze se utori u koje se stavlja trofazni namot. Kao nosač i kao zaštita limova i namota služi kućište stroja koje se izrađuje od lijevanog željeza, čelika, silumina, itd. U sredini se nalaze ležajni štitovi u obliku poklopca gdje su smješteni ležaji za osovinu na kojoj se nalazi rotor. Rotor je sastavljen slično kao i stator. Sastoji se od osovine i rotorskog paketa. Rotorski paket je izveden kao valjak od dinamo limova uzduž čije vanjske strane se nalaze utori za smještaj rotorskog namota. Kada je rotorski namot izveden od štapova bakra, bronce ili aluminija koji su s obje strane prstenima kratko spojeni, tada je to kavezni asinkroni motor. Na eksperimentalnom postavu se koristi trofazni kavezni asinkroni elektromotor proizvođača Siemens, tip 1LA7196-4AA11 (Slika 2.6).

Karakteristike elektromotora:

- Snaga –  $P_{em} = 2.2 \text{ kW}$
- Nazivni napon –  $U_{em} = 230/400 \text{ V } (\Delta/Y)$
- Nazivna struja –  $I_{em} = 8.2/4.7 \text{ A } (\Delta/Y)$
- Brzina vrtnje –  $n_{em} = 1420 \text{ okr/min}$
- Frekvencija –  $f_{em} = 50 \text{ Hz}$
- Masa –  $m = 24 \text{ kg}$

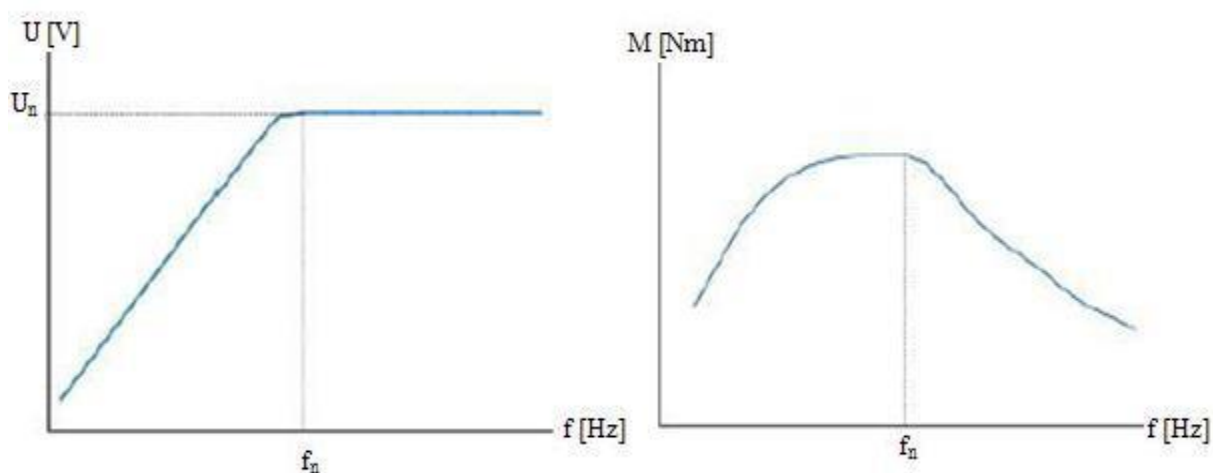


**Slika 2.6** Elektromotor *Siemens 1LA7*

## Frekvencijski pretvarač

Frekvencijski pretvarač, uz regulaciju brzine vrtnje elektromotora, omogućuje i kontrolu karakteristika motora pri ubrzanju i zaustavljanju. U sami pretvarač ugrađene su zaštitne funkcije, te sklopovi koji omogućuju upravljanje svim funkcijama i povezivanje s drugim procesima i različitim tipovima komunikacije. Uporabom frekvencijskih pretvarača smanjuje se broj potrebnih elemenata u sustavu te se poboljšava fleksibilnost i efikasnost samih pogona. Najčešći načini upravljanja motorom su: naponsko-frekvencijsko upravljanje, vektorsko upravljanje i vektorsko upravljanje sa zatvorenom petljom.

U eksperimentu se koristi naponsko-frekvencijsko (U/f) upravljanje. Ono koristi linearnu promjenu napona i frekvencije ovisno o željenoj brzini vrtnje elektromotora. Ovisnost napona i momenta o porastu frekvencije dana je na slici 2.7.



**Slika 2.7 Ovisnost napona i momenta o porastu frekvencije**

Izborom određenih parametara pretvarača moguće je mijenjati način upravljanja elektromotorom. Pri korištenju frekvencijskog pretvarača za upravljanje pogonom potrebno je poznavati karakteristike pogona, načine rješenja i primjenu. Kod projektiranja je bitno odabrati odgovarajuće elemente pogona u ovisnosti o potrebama tereta. Jedan od važnih parametara pri odabiru pogonskog elektromotora je raspon regulacije brzine. Na osnovu njega i podataka o momentu tereta mogu se odabrati elementi pogona. Radi dinamike sustava, važan podatak pri projektiranju je i moment inercije tereta.

U radu je korišten frekvencijski pretvarač Sinamics G-110, tvrtke Siemens (Slika 2.8). On ima rezerviran jedan analogni ulaz kojim se mijenja frekvencija napona koja se šalje na pogonski elektromotor. Kod upravljanja na principu prigušenja analogni ulaz se deaktivira tako da namjestimo parametar pretvarača P0702 na vrijednost 10. U tom slučaju je frekvencija izlaznog napona konstantna i iznosi 50 Hz. Kod upravljanja na principu promjene količine protoka radnog fluida parametar P0702 postavljamo na vrijednost 16. Na taj način se aktivira analogni ulaz frekvencijskog pretvarača, te se pomoću analognog signala napona od 0 do 10 V mijenja frekvencija izlaznog napona u rasponu od 0 do 50 Hz.



**Slika 2.8** Frekvencijski pretvarač *Siemens Sinamics G-110*

## Filtri ulja

Filtri ulja omogućuju normalan rad i povećavaju trajnost sustava. Povećavanjem kvalitete izrade elemenata, smanjuje se zračnost između kliznih elemenata za što je potrebna bolja filtracija ulja. Danas se zahtjeva minimalna finoća filtriranja za čestice do 20  $\mu\text{m}$ , a za sustave sa servo ventilima i do 3  $\mu\text{m}$ , dok su nekada ti zahtjevi bili od 80 do 100  $\mu\text{m}$ .

Krute nečistoće u hidrauličkoj tekućini mogu dovesti do [3]:

- Jačeg istjecanja ulja uslijed lošeg brtvljenja,
- Blokiranja rada kliznih djelova,
- Promjene karakteristike regulacije protoka,
- Smanjenja vijeka trajanja hidrauličkih elemenata i cijelog sustava.

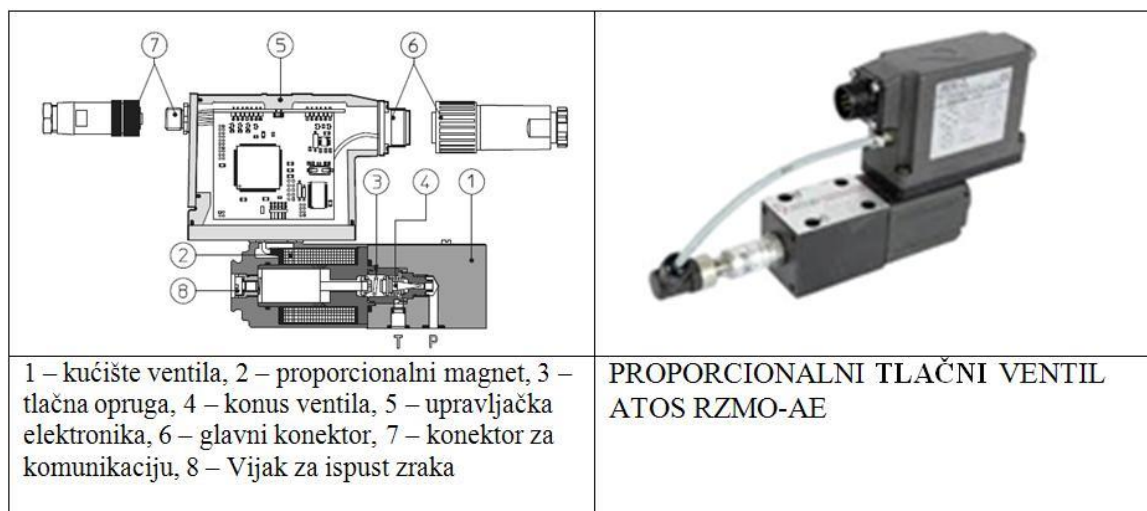
### 2.3.2. Upravljački dio sustava

#### Proporcionalni tlačni ventil

Proporcionalni tlačni ventil služi za simulaciju tereta hidromotora, tako da pruža otpor crpki koju hidromotor pokreće. Prednosti proporcionalnih uređaja su kontrolirani prijelazi između radnih položaja, kontinuirano upravljanje protokom ili tlakom radnog fluida i smanjenje broja hidrauličkih uređaja. Proporcionalni ventil se može izložiti velikom tlaku pa nije potreban drenažni priključak za odvod iscurjelog ulja, što znači da nema dodatnog trenja koje bi negativno utjecalo na točnost ventila. Korišten je proporcionalni tlačni ventil proizvođača Atos, tip RZMO-AE-030/210 (Slika 2.9).

Karakteristike ventila su:

- Maksimalni regulacijski tlak –  $p_{R,\max} = 21 \text{ Mpa} = 210 \text{ bar}$
- Minimalni regulacijski tlak –  $p_{R,\min} = 0.6 \text{ Mpa} = 6 \text{ bar}$
- Maksimalni tlak tlačnog voda –  $p_{P,\max} = 31.5 \text{ Mpa} = 315 \text{ bar}$
- Maksimalni tlak povratnog voda –  $p_{T,\max} = 21 \text{ Mpa} = 210 \text{ bar}$
- Maksimalni protok –  $Q_{\max} = 40 \text{ l/min}$
- Minimalni protok –  $Q_{\min} = 2.5 \text{ l/min}$
- Raspon ulaznog signala – 0 do 10 V



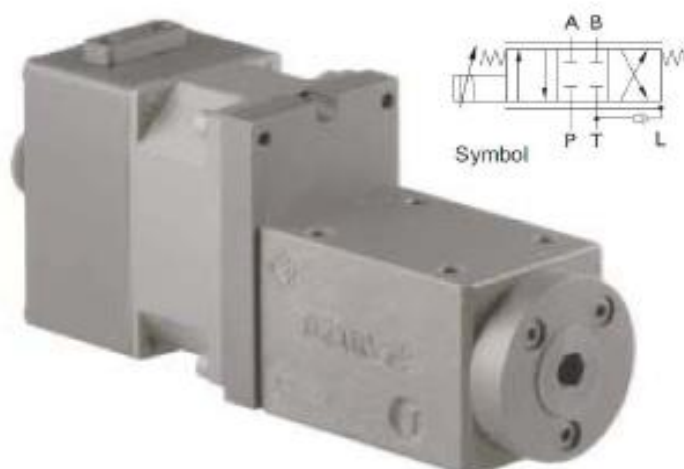
**Slika 2.9** Proporcionalni tlačni ventil *Atos RZMO*

### Servo ventil

Servo ventil služi kao izvršni član kod upravljanja prigušenjem. U eksperimentu je korišten servo ventil Schneider Kreuznach, model HVM 061-005-1200-0C-E1. To je 4/3 servo ventil sa integriranom elektronikom (Slika 2.10).

Karakteristike servo ventila:

- Nazivni tlak –  $p_N = 21 \text{ MPa} = 210 \text{ bar}$
- Maksimalni tlak –  $p_{b,\max} = 31.5 \text{ Mpa} = 315 \text{ bar}$
- Nazivni protok –  $Q_L = 5 \text{ l/min}$
- Raspon ulaznog signala –  $\pm 10 \text{ V}$

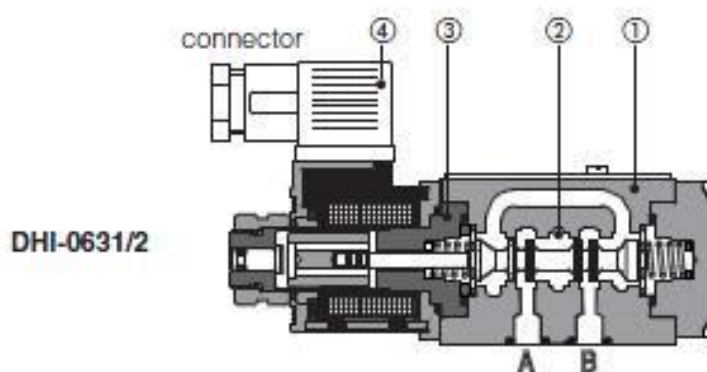


**Slika 2.10** Servo ventil *Schneider Kreuznach HVM 061*



### Elektromagnetski ventil 4/2

Elektromagnetski ventil služi kao osiguranje. Na ulaz ventila dovodi se signal koji je vremenski namješten da se uključuje i isključuje po potrebi programa koji se izvršava. Programski je namješteno da se prvo uključuje elektromagnetski ventil 4/2, a nakon njega frekvencijski pretvarač, te se istim redoslijedom isključuju. Korišten je elektromagnetski ventil 4/2 proizvođača Atos, model DHI-0 63 1/2 /A (Slika 2.11). Ventil može raditi protokom do 60 l/min i s maksimalnim tlakom 350 bar. Budući da se uključuje na 24 V, potrebno je za njega imati odgovarajući relej u elektroničkom ormaru.



Slika 2.11 Elektromagnetski ventil Atos DHI-0 63

### Kuglaste slavine

Kuglaste slavine nam služe kao prenosnice ulja i pomoću njih se zaustavlja protok ulja kroz elemente koji su u paralelnom spoju s njima. U postavu se nalaze dvije kuglaste slavine. Jedna slavinica se nalazi u paralelnom spoju sa servo ventilom jer su predviđena dva načina regulacije sustava. Kod upravljanja prigušenjem, slavinica je zatvorena tako da fluid prolazi kroz servo ventil, dok je kod upravljanja promjenom volumena radnog fluida slavinica otvorena tako da radni fluid prolazi kroz nju, a ne servo ventil. Druga slavinica se nalazi u paralelnom spoju sa proporcionalnim tlačnim ventilom. Kada je slavinica otvorena imamo slučaj rada bez tereta i taj način se koristi kod testiranja sustava. Tek kada sustav radi kako treba bez tereta tada se slavinica može zatvoriti tako da onda imamo rad sustava sa simulacijom tereta.

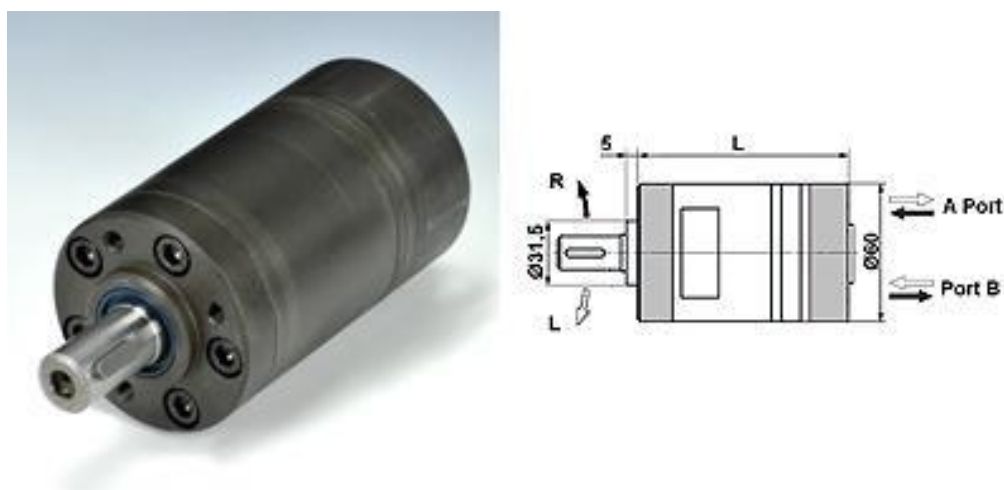
### Sigurnosni ventil

Kao sigurnosni ventil korišten je tlačni ventil za ograničenje tlaka. On je priključen paralelno na glavni vod te ograničava radni tlak fluida na tlak namješten na vijku s oprugom. U eksperimentu je tlak namješten na  $p_1 = 180$  bar.

### 2.3.3. Izvršni dio sustava

#### Hidraulički motor

Suprotno crpkama, motori pretvaraju energiju fluida u mehanički rad. Konstrukcija rotacijskih motora i crpki je u osnovi identična što često rezultira time da se isti stroj koristi i kao crpka i kao motor. Motori se prema brzini vrtnje dijele na sporohodne (do 1000 okr/min) i brzohodne. U radu je korišten hidraulički zupčasti gerotor motor proizvođača Hansa Flex, tip LÖSi HK-EPMM 008 C (Slika 2.12).



**Slika 2.12 Hidromotor Hansa Flex LÖSi HK-EPMM**

Gerotor motori (Slika 2.13) imaju ekscentrično postavljen unutrašnji zupčanik te klizni rotirajući vanjski zupčanik. Oba zupčanika rotiraju oko fiksne ekscentrične osi. Ti motori su predviđeni za velike brzine vrtnje uz nešto manji radni moment.



Slika 2.13 Gerotor motor

Karakteristike hidromotora korištenog u eksperimentu:

- Specifični protok –  $q_{rm} = 13.05 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{rad}$
- Broj okretaja –  $n_m = 1950 \text{ okr/min}$
- Maksimalni okretni moment –  $T_{max} = 11 \text{ Nm}$
- Maksimalni protok –  $Q_m = 2.67 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 16 \text{ l/min}$
- Maksimalni radni tlak –  $p_{max} = 10^7 \text{ Pa} = 100 \text{ bar}$

#### Dodatna hidraulička crpka

Dodatna crpka se koristi za terećenje hidromotora. Koristi se također crpka proizvođača ViVoil, tip XV-1P (Slika 2.5) samo što je radni volumen crpke za terećenje manji i iznosi  $V_{DC} = 2.6 \text{ cm}^3$ . Pa je maksimalni protok crpke:

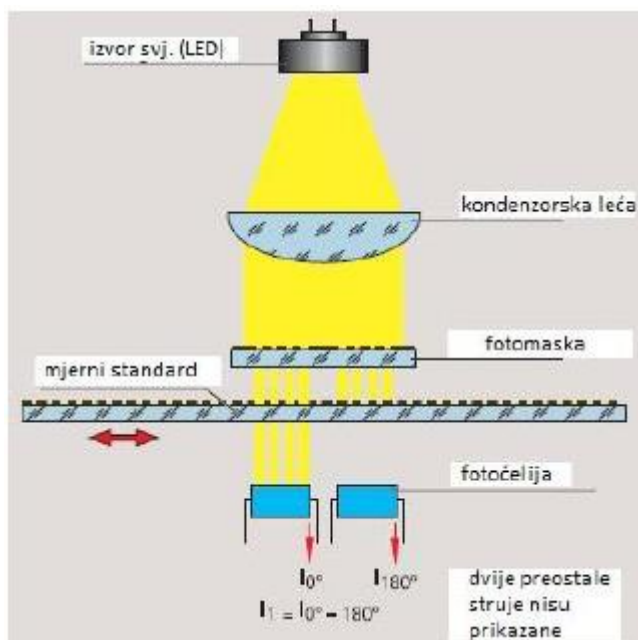
$$Q_{DC,max} = V_{DC} \cdot n_{em} = 2.6 \cdot 10^{-6} \cdot 1950/60 = 8.45 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} = 5.07 \text{ l/min} \quad (2.2)$$

#### 2.3.4. Mjerni dio sustava

##### Inkrementalni enkoder

Enkoderi su mjerni pretvarači kutnog ili linearnog pomaka. Dije se na inkrementalne i apsolutne. Inkrementalni enkoderi na izlazu daju impulse čiji broj ovisi o veličini pomaka. Inkrementalni enkoderi sadrže stakleni disk na kojem se nalazi traka koja propušta svjetlosne impulse na fotočeliju. Impulsi nastaju uslijed rotacije diska jer se sa jedne strane diska nalazi izvor svjetlosti (LED), dok je sa druge strane fotočelija. Crna traka iscrtana od sredine prema rubu diska prekida snop svjetlosti tako da fotočelija pri svakom okretaju daje jedan impuls. Princip rada inkrementalnog enkodera je dan na slici 2.14. Inkrementalni enkoder postavlja se na vratilo hidromotora i predstavlja mjerni član zatvorenog regulacijskog kruga.

U postavu koristimo inkrementalni enkoder proizvođača Heidenhein, tip ERN 120 (Slika 2.15). Broj impulsa enkodera je 1024, međutim, koristi se još i uređaj koji povećava frekvenciju impulsa 4 puta, pa je ukupan broj impulsa 4096 po okretaju.



**Slika 2.14** Princip rada inkrementalnog enkodera



**Slika 2.15** Inkrmentalni enkoder *Heidenhein ERN 120*

## Senzori tlaka

Senzori tlaka koje koristimo su Siemens Sitrans P serie Z Typ 7MF1564 250. Oni rade na tlakovima od 0 do 250 bar i generiraju napon od 0 do 10 V (Slika 2.16).



**Slika 2.16** Senzor tlaka Siemens Sitrans P serije Z

## Manometri

Manometri nam koriste za nadzor tlakova u sustavu i za namještanje parametara određenih hidrauličkih elemenata sustava, kao što je npr. određivanje reda veličine mjerne jedinice na senzoru tlaka, namještanje tlaka na sigurnosnom ventilu i sl.

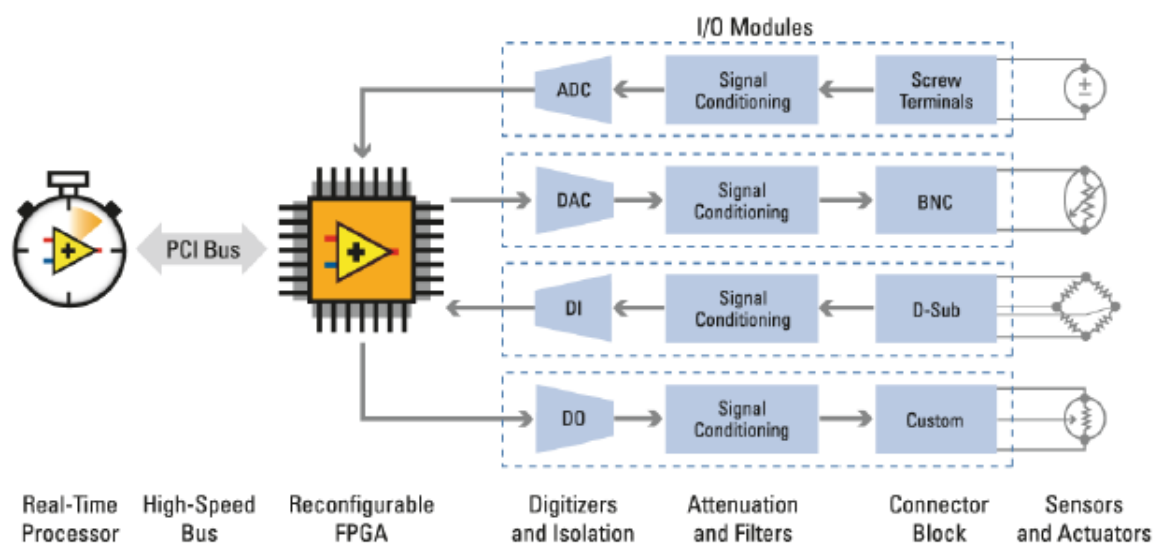
### 2.3.5. Upravljačko računalo i upravljački uređaj CompactRIO

Upravljačko računalo mora imati instaliran program LabVIEW 2011 ili noviji. Uz to, također treba instalirati FPGA Module, Real-Time Module i PID Toolkit. Za prebacivanje programa iz LabVIEW-a na upravljački modul CompactRIO potreban je pogonski drajver NI Scan Engine 4.0. Za povezivanje upravljačkog računala sa CompactRIO-m koristi se Ethernet kabel tako da je računalo poslužitelj, odnosno server, a CompactRIO je klijent.

Upravljački uređaj CompactRIO je je robusni rekonfigurabilni sustav za upravljanje i akviziciju, a proizvodi ga tvrtka National Instruments. CompactRIO također predstavlja programibilni automatizacijski kontroler koji omogućuje visoke performanse, fleksibilnost i brzi razvoj.

Sastoji se od tri glavne komponente (Slika 2.17):

- Procesor za izvođenje u stvarnom realnom vremenu,
- FPGA (eng. Field Programmable Gate Array) čip,
- Industrijski ulazno/izlazni moduli.



**Slika 2.17** Glavne komponente uređaja *CompactRIO*

### *Integrirani Real-Time kontroler i rekonfigurabilno FPGA kućište*

Real-time kontroler sadrži industrijski procesor koji pouzdano i deterministički izvršava LabVIEW Real-time aplikaciju i omogućuje visoke performanse i komunikaciju sa perifernim uređajima.

U radu korišteni CompactRIO 9076 uređaj (Slika 2.18) sadrži Xilinx Spartan-6 LX45 rekonfigurabilni FPGA čip. CompactRIO 9076 ima minimalno 512 MB nepromjenjive memorije, 256 MB sistemske memorije, 54576 bistabila, 27288 6-ulaznih LUT-a (eng. LookUp Tables), 2088 kbit dostupne blok RAM memorije, 5 DMA (eng. Direct Memory Access) sabirnica, 58 DSP48 (eng. Digital Signal Processing) blokova i 43661 logičkih sklopova [4].

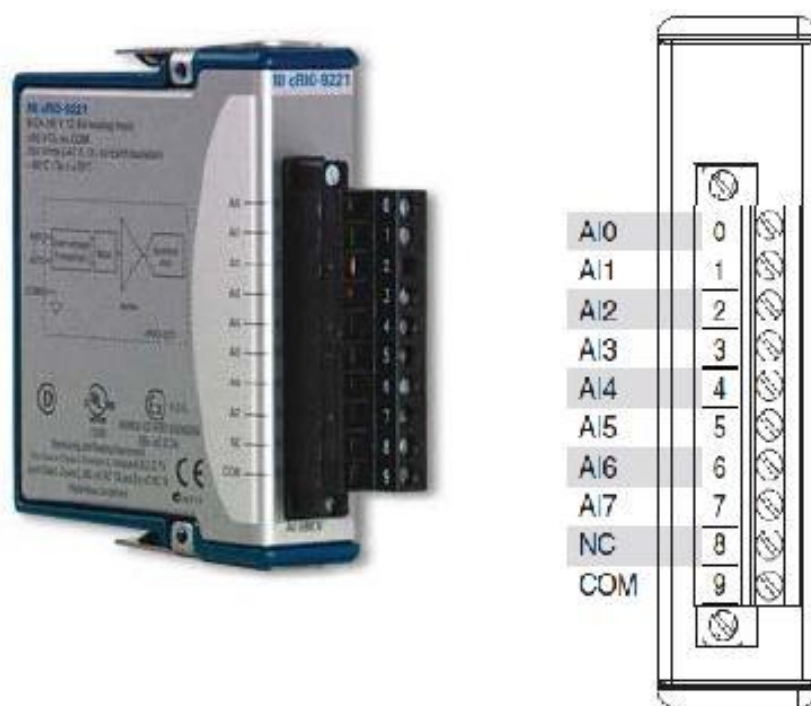


**Slika 2.18** Upravljački uređaj *NI CompactRIO 9076*

Rekonfigurabilno FPGA kućište je središnji dio sustava. Na kućište CompactRIO 9076 moguće je spojiti 4 ulazno/izlaznih (I/O) modula. Svaki I/O modul je direktno spojen preko FPGA čipa, tako da praktički nema kašnjenja unutar sustava. FPGA automatski komunicira sa I/O modulima i omogućuje determinističko izvršavanje na procesoru koji radi u stvarnom realnom vremenu. FPGA omogućuje izvršavanje jedne petlje programa za manje od 500 ns.

#### *Ulazno/Izlazni moduli*


Ulazno/Izlazni moduli sadrže izolaciju, pretvorbu strujnih krugova, sklop za kondicioniranje signala i izgrađeno sučelje za direktno spajanje na senzore/aktuatora. Da bi se očitali signali sa senzora tlaka, potreban je analogni ulazni modul. S obzirom da se u sustavu koristi mjerni raspon od 0 do 10 V, odgovarajući modul bi bio NI 9215, međutim on nije bio dostupan. Zbog toga je korišten zamjenski modul NI 9221 (Slika 2.19). On sadrži 8 analognih ulaza na koje se sa senzora može dovesti 8 analognih signala sa masom ili 4 diferencijalna analogna signala, a mjerno područje mu je  $\pm 60$  V.



**Slika 2.19 Analogni ulazni modul NI 9221**


Za upravljanje proporcionalnim tlačnim ventilom i servo ventilom, odnosno frekvencijskim pretvaračem, potrebni su analogni izlazi. U tu svrhu je korišten modul NI 9263 (Slika 2.20). On sadrži 4 analoga izlaza u mjernom rasponu od  $\pm 10$  V. U eksperimentu se koriste dva izlaza, jedan je za proporcionalni tlačni ventil, a drugi za servo ventil i frekvencijski pretvarač. Odabir između servo ventila i frekvencijskog pretvarača se obavlja pomoću mehaničke sklopke.



Module	Terminal	Signal
	0	AO0
	1	Common (COM)
	2	AO1
	3	Common (COM)
	4	AO2
	5	Common (COM)
	6	AO3
	7	Common (COM)
	8	No Connection
	9	Common (COM)

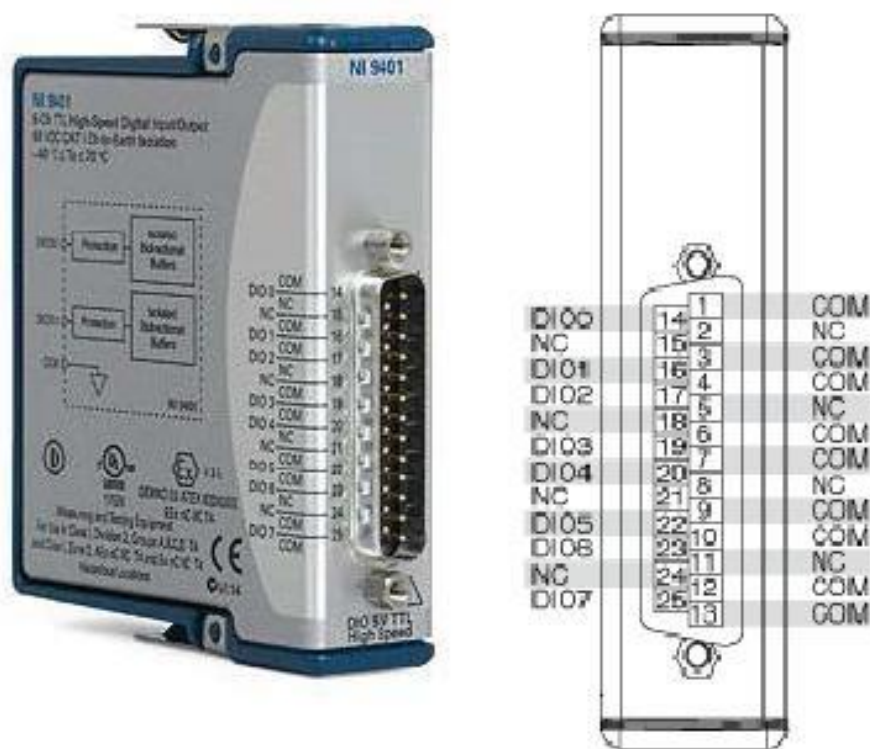
Slika 2.20 Analogni izlazni modul NI 9263

Za upravljanje elektromagnetskim ventilom i relejem za uključivanje frekvencijskog pretvarača, potrebni su digitalni izlazi. Korišteni modul je NI 9474 (Slika 2.21). NI 9474 sadrži 8 digitalnih izlaza podesivih od 5 do 30 V.

Module	Terminal	Signal
	0	DO0
	1	DO1
	2	DO2
	3	DO3
	4	DO4
	5	DO5
	6	DO6
	7	DO7
	8	Supply (Vsup)
	9	Common (COM)

Slika 2.21 Digitalni izlazni modul NI 9474

Za regulaciju brzine vrtnje potrebno je mjeriti brzinu vrtnje, a s obzirom da se za to koriste inkrementalni enkodери, potreban je prihvat tako brzog signala. Za to se koristi modul sa brzim (High Speed) digitalnim ulazima NI 9401 (Slika 2.22). On ima 8 digitalnih ulaza napona visokog logičkog stanja od 5 V koji se mogu prenamjeniti. U postavkama modula, mogu se jednostavno pretvoriti u brojače. S obzirom da je CompactRIO baziran na FPGA tehnologiji, moguće je preko signala brojača odrediti frekvenciju, tj. broj okretaja po sekundi bez programskog uzrokovanja i pretvorbi. To sve CompactRIO obavlja u sebi i u proračun šalje realni broj i u regulacijsku petlju se spaja na isti način na koji bi se spajao analogni signal.



Slika 2.22 Digitalni ulazni modul NI 9401

### 3. MATEMATIČKI MODEL

Matematički model sustava prikazuje funkcijsku ovisnost izlaznih i ulaznih veličina sustava, a prikazuje se diferencijalnim ili integralno-diferencijalnim jednadžbama. Kod hidrauličkih sustava, za postavljanje matematičkog modela koriste se zakoni očuvanja energije i materije. Svrha matematičkog modela je da se što bolje opiše dinamičko ponašanje neke komponente sustava. Kod matematičkog modela nije potrebno opisivati sve fizikalne pojave određene komponente jer bi takav sustav bio presložen.

Nelinearni sustavi opisuju se nelinearnim diferencijalnim jednadžbama, dok se linearni opisuju linearnim diferencijalnim jednadžbama s konstantnim koeficijentima. Nelinearnosti u elementima su uglavnom nepoželjne jer unose dodatna kašnjenja u sustav, teško se matematički opisuju i teško je predvidjeti ponašanje sustava.

Analiza nelinearnih sustava je važna iz nekoliko razloga. Prvo, teorijska analiza je najjeftiniji način za ispitivanje karakteristika sustava. Drugo, simulacije koje su važne u nelinearnom upravljanju se temelje na teorijskoj analizi. Treće, projektiranje regulatora je uvijek temeljeno na tehnikama analize sustava. Analiza nelinearnih sustava omogućuje uspješnije projektiranje sustava, bolju izvedbu te može ukazati na probleme do kojih može doći kod regulacije sustava.

Kod primjene metode linearne analize, model ne smije sadržavati nelinearnosti. Zbog toga se veličine koje nemaju veći utjecaj na dinamičko ponašanje sustava zanemaruju, a karakteristike komponenata lineariziraju i vrijede u definiranom radnom području. Linearizirani matematički model je pojednostavljen i izveden pomoću mnogo pretpostavki, zanemarivanja, aproksimacija i lineariziranja statičkih karakteristika.

### 3.1. Upravljanje na principu prigušenja

Sustav se sastoji od hidromotora opterećenog određenim teretom kojeg predstavlja crpka za terećenje te od električnog servoventila koji upravlja protokom ulja kroz hidromotor.

#### 3.1.1. Nelinearni model

Prijenosna funkcija servoventila se najčešće pojednostavljuje na prijenosnu funkciju 1. reda s vremenskom konstantom  $T$  koju dobijemo iz Bode-ovog dijagrama kao recipročnu vrijednost lomne frekvencije  $T_v = 1/\omega_v$ .

$$\frac{y_v(s)}{i(s)} = \frac{K_v}{T_v \cdot s + 1} \quad (3.1)$$

Jednadžbe protoka kroz servo ventil [2]:

$$Q_1(y_v, p_1) = \begin{cases} y_v \cdot \sqrt{|p_s - p_1|} \cdot \operatorname{sgn}(p_s - p_1) & \text{za } y_v \geq 0 \\ y_v \cdot \sqrt{|p_1 - p_a|} \cdot \operatorname{sgn}(p_1 - p_a) & \text{za } y_v < 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

$$Q_2(y_v, p_2) = \begin{cases} -y_v \cdot \sqrt{|p_2 - p_a|} \cdot \operatorname{sgn}(p_2 - p_a) & \text{za } y_v \geq 0 \\ -y_v \cdot \sqrt{|p_s - p_2|} \cdot \operatorname{sgn}(p_s - p_2) & \text{za } y_v < 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

gdje je:

$p_1$  – tlak u lijevoj komori hidromotora

$p_2$  – tlak u desnoj komori hidromotora

$p_s$  – tlak napajanja

$p_a$  – tlak spremnika

Kao pretpostavka uzima se da su tlakovi spremnika i napajanja konstantne vrijednosti, a protoci  $Q_1$  i  $Q_2$  jednaki:

$$Q_1(y_v, p_1) = -Q_2(y_v, p_2) \quad (3.4)$$

Za hidromotor vrijedi:

$$\frac{V_t}{B} \cdot \frac{dp}{dt} + \frac{dV}{dt} = Q \quad (3.5)$$

gdje je:

$B$  – modul stišljivosti ulja

$V_t$  – volumen hidromotora

$p$  – tlak hidromotora

$Q$  – protok hidromotora

Volumeni dvaju komora hidromotora mijenjaju se sa kutom zakreta hidromotora  $\Theta_m$ :

$$\begin{aligned} V_1 &= V_0 + q_{rm} \cdot \Theta_m \\ V_2 &= V_0 - q_{rm} \cdot \Theta_m \end{aligned} \quad (3.6)$$

gdje je:

$q_{rm}$  – specifični protok hidromotora

$V_0$  – poluvolumen hidromotora

Uvrštavanjem jednadžbe (3.6) u (3.5), dobivamo ponašanje tlaka unutar dviju komora hidromotora, gdje je  $\dot{\Theta}_m$  kutna brzina hidromotora:

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{B}{V_0 + q_{rm} \cdot \Theta_m} (Q_1 - q_{rm} \cdot \dot{\Theta}_m) \quad (3.7)$$

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{B}{V_0 - q_{rm} \cdot \Theta_m} (Q_2 + q_{rm} \cdot \dot{\Theta}_m) \quad (3.8)$$

Mehanički dio sustava možemo opisati sljedećom jednadžbom:

$$J_\tau \cdot \frac{d^2 \Theta_m}{dt^2} = q_{rm} \cdot p_1 - q_{rm} \cdot p_2 - b_m \frac{dy}{dt} - c_m \cdot \Theta_m - M_v \quad (3.9)$$

gdje je:

$J_t$  – moment inercije tereta

$b_m$  – koeficijent prigušenja tereta

$c_m$  – koeficijent elastičnosti tereta

### 3.1.2. Linearizirani model

Linearizirani oblik jednadžbe statičke karakteristike protoka je:

$$Q_L = K_q \cdot y_v - K_c \cdot p_L \quad (3.10)$$

pri čemu su koeficijent pojačanja protoka servo ventila:

$$K_q = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot C_d \cdot d_v \cdot \sqrt{\frac{p_s - p_L}{\rho}} \quad (3.11)$$

I koeficijent otjecanja servo ventila:

$$K_c = \frac{\pi \cdot C_d \cdot d_v \cdot y_v}{\sqrt{2} \cdot \rho \cdot \sqrt{\frac{p_s - p_L}{\rho}}} \quad (3.12)$$

gdje je:

$C_d$  – koeficijent istjecanja servo ventila

$y_v$  – pomak klipa servo ventila

$w = \pi \cdot d_v$  – opseg razvodnog klipa servo ventila

$d_v$  – promjer klipa servo ventila

$p_1, p_2$  – tlakovi suprotnih strana hidromotora

$\rho$  – gustoća ulja

Prijenosna funkcija servo ventila je:

$$G(s) = \frac{K_v}{T_v \cdot s + 1} \quad (3.13)$$

Što predstavlja  $P_1$  član.

Protok kroz opterećeni servo ventil treba biti toliki da može dati potrebnu brzinu hidromotoru, kompenzirati gubitke otjecanja u hidromotoru i protok zbog kompresibilnosti fluida.

$$Q_L = q_{rm} \cdot \dot{\Theta}_m + K_{1m} \cdot p_L + \frac{V_t}{4B} \cdot \dot{p}_L \quad (3.14)$$

Jednadžba ravnoteže zakretnih momenata na vratilu hidromotora glasi:

$$(p_1 - p_2) \cdot q_{rm} = J\ddot{\Theta}_m + b_m \dot{\Theta}_m + c_m \Theta_m + M_v \quad (3.15)$$

Nakon Laplaceove transformacije dobivamo:

$$\begin{aligned} Q_L &= q_{rm} s \Theta_m(s) + \left( K_{1m} + \frac{V_t}{4B} s \right) p_L \\ (Js^2 + b_m s + c_m) \Theta_m(s) - q_{rm} p_L - M_v &= 0 \rightarrow p_L = \frac{Js^2 + b_m s + c_m}{q_{rm}} \Theta_m(s) + \frac{M_v}{q_{rm}} \\ s \Theta_m(s) &= \frac{Q_L}{q_{rm}} - \left( \frac{V_t}{4B} s + K_{1m} \right) \cdot \frac{p_L}{q_{rm}} \\ \Theta_m(s) \left[ \frac{JV_t}{4Bq_{rm}^2} s^3 + \left( \frac{K_{ce}J}{q_{rm}^2} + \frac{V_t b_m}{4Bq_{rm}^2} \right) s^2 + \left( \frac{K_{ce}b_m}{q_{rm}^2} + \frac{V_t b_m}{q_{rm}^2} + 1 \right) s + \frac{K_{ce}c_m}{q_{rm}^2} \right] &= \\ = \frac{K_q}{q_{rm}} y_v - \frac{K_{ce}}{q_{rm}^2} \left( 1 + \frac{V_t}{4BK_{ce}} s \right) M_v \\ \Theta_m(s) &= \frac{\frac{K_q}{q_{rm}} y_v - \frac{K_{ce}}{q_{rm}^2} \left( 1 + \frac{V_t}{4BK_{ce}} s \right) M_v}{\frac{JV_t}{4Bq_{rm}^2} s^3 + \left( \frac{K_{ce}J}{q_{rm}^2} + \frac{V_t b_m}{4Bq_{rm}^2} \right) s^2 + \left( \frac{K_{ce}b_m}{q_{rm}^2} + \frac{V_t b_m}{q_{rm}^2} + 1 \right) s + \frac{K_{ce}c_m}{q_{rm}^2}} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Kvocijent  $q_{rm}^2/K_{ce}$  je koeficijent prigušenja i obično je znatno veći od koeficijenta viskoznog trenja  $b$ , tako da se u nazivniku može zanemariti član  $bK_{ce}/q_{rm}^2$ . Kada ne postoji opterećenje torzijskom oprugom ( $c=0$ ), izraz se dodatno pojednostavljuje:

$$\Theta_m(s) = \frac{\frac{K_q}{q_{rm}} y_v - \frac{K_{ce}}{q_{rm}^2} \left(1 + \frac{V_t}{4BK_{ce}} s\right) M_v}{\frac{JV_t}{4Bq_{rm}^2} s^3 + \left(\frac{K_{ce}J}{q_{rm}^2} + \frac{V_t b_m}{4Bq_{rm}^2}\right) s^2 + s} \quad (3.17)$$

odnosno

$$\Theta_m(s) = \frac{\frac{K_q}{q_{rm}} y_v - \frac{K_{ce}}{q_{rm}^2} \left(1 + \frac{V_t}{4BK_{ce}} s\right) M_v}{s \left[ \left(\frac{JV_t}{4Bq_{rm}^2} s^2 + \left(\frac{K_{ce}J}{q_{rm}^2} + \frac{V_t b_m}{4Bq_{rm}^2}\right) s + 1\right) \right]} \quad (3.18)$$

Izraz za hidrauličku neprigušenu vlastitu frekvenciju je:

$$\omega_h = \sqrt{\frac{4 \cdot B \cdot q_{rm}^2}{V_t \cdot J}} \quad (3.19)$$

Hidraulički koeficijent prigušenja je:

$$\zeta_h = \frac{K_{ce}}{q_{rm}} \sqrt{\frac{B \cdot J}{V_t}} + \frac{b_m}{4q_{rm}} \sqrt{\frac{V_t}{B \cdot J}} \quad (3.20)$$

Preuređen i pojednostavljen izraz (3.18) čini dinamički odziv hidromotora u slučaju kada istovremeno djeluju ulazna veličina ( $y_v$ ) i vanjski moment ( $M_v$ ). Iz tog izraza možemo dobiti prijenosne funkcije za svaku ulaznu veličinu posebno.

Ako je ulazna veličina pomak klipa servo ventila, a nema vanjskog opterećenja, tada je prijenosna funkcija:

$$G_1(s) = \frac{\Theta_m(s)}{y_v(s)} = \frac{\frac{K_q}{q_{rm}}}{s \left( \frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (3.21)$$



Ako je ulazna veličina vanjski moment, onda dobivamo drugu prijenosnu funkciju:

$$G_2(s) = \frac{\Theta_m(s)}{M_v(s)} = \frac{-\frac{K_{ce}}{q_{rm}^2} \left(1 + \frac{V_t}{4BK_{ce}}s\right)}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h}{\omega_h}s + 1\right)} \quad (3.22)$$

Prijenosna funkcija  $G_1$  je najčešće upotrebljavani oblik koji se koristi pri projektiranju sustava.

### 3.2. Upravljanje na principu promjene količine protoka radnog fluida

Kod ovog načina upravljanja temeljnu ulogu dobiva pogonski sklop koji se sastoji od frekvencijskog pretvarača i elektromotora i oni predstavljaju izvršni član regulacijskog kruga. Za prijenosnu funkciju frekvencijskog pretvarača i elektromotora uzima se prijenosna funkcija 1. reda [5].

$$\frac{\omega_{em}(s)}{u_{fp}(s)} = \frac{K_{ps}}{T_{ps} \cdot s + 1} \quad (3.23)$$

gdje je:

$\omega_{em}$  – brzina vrtnje elektromotora

$u_{fp}$  – napon na ulazu frekvencijskog pretvarača

$K_{ps}$  – koeficijent pojačanja pogonskog sklopa

$T_{ps}$  – vremenska konstanta pogonskog sklopa

Jednadžbu protoka sustava možemo zapisati kao:

$$Q_p - Q_m = \frac{V_t}{B} \cdot \dot{p}_1 \quad (3.24)$$

Odnosno, kada raspišemo izraze za protok pumpe i motora, jednadžba glasi:

$$q_{rp} \cdot \omega_p - C_{ip}(p_1 - p_2) - C_{sp}(p_1) - q_{rm} \cdot \frac{d\Theta_m}{dt} - C_{im}(p_1 - p_2) - C_{sm}(p_1) = \frac{V_t}{B} \cdot \frac{dp_1}{dt} \quad (3.25)$$

gdje je:

$V_t$  – ukupni radni volumen fluida pod tlakom

$q_{rp}$  – specifični protok crpke

$q_{rm}$  – specifični protok hidromotora

Nakon Laplaceove transformacije:

$$q_{rp} \cdot \omega_p + C_{it}p_2 = q_{rm}\Theta_ms + C_t p_1 + \frac{V_t}{B} p_1 s \quad (3.26)$$

gdje je:

$C_{it} = C_{ip} + C_{im} \rightarrow$  ukupni unutarnji koeficijent otjecanja

$C_{st} = C_{sp} + C_{sm} \rightarrow$  ukupni vanjski koeficijent otjecanja

$C_t = C_{it} + C_{st} \rightarrow$  ukupni koeficijent otjecanja

Prema zakonu očuvanja energije dobivamo jednadžbu ravnoteže momenata [6]:

$$(p_1 - p_2)q_{rm} = J_t \ddot{\Theta}_m + b_m \dot{\Theta}_m + \frac{\dot{\Theta}_m}{|\dot{\Theta}_m|} (p_1 + p_2) C_f q_{rm} + M_v \quad (3.27)$$

$C_f$  predstavlja nelinearnost i mora se izjednačiti sa nulom za linearni model. Nakon što uvrstimo  $C_f = 0$  i zatim provedemo Laplaceovu transformaciju, dobivamo:

$$p_1 q_{rm} = J_t \Theta_m s^2 + b_m \Theta_m s + p_2 q_{rm} + M_v \quad (3.28)$$

Jednadžbe (3.26) i (3.28) opisuju sustav. Budući da kao pretpostavku uzimamo da je  $p_2$  konstantan, možemo ga zanemariti kod linearne analize. Kombinacijom tih dviju jednadžbi dobivamo:

$$\Theta_m(s) = \frac{\frac{q_{rp} \cdot \omega_p}{q_{rm}} - \frac{C_t}{q_{rm}^2} \left(1 + \frac{V_t}{B C_t} s\right) M_v}{\frac{J_t V_t}{B V_m^2} s^3 + \left(\frac{C_t J_t}{q_{rm}^2} + \frac{V_t b_m}{B q_{rm}^2}\right) s^2 + \left(\frac{C_t b_m}{q_{rm}^2} + 1\right) s} \quad (3.29)$$

Kvocijent  $C_t b_m / V_m^2$  je najčešće vrlo malen i može se zanemariti, pa dobivamo:

$$\Theta_m(s) = \frac{\frac{q_{rp} \cdot \omega_p}{q_{rm}} - \frac{C_t}{q_{rm}^2} \left(1 + \frac{V_t}{B C_t} s\right) M_v}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h}{\omega_h} s + 1\right)} \quad (3.30)$$

Pri čemu je izraz za hidrauličku neprigušenu vlastitu frekvenciju jednak:

$$\omega_h = \sqrt{\frac{B \cdot q_{rm}^2}{V_t \cdot J_t}} \quad (3.31)$$

A izraz za hidraulički koeficijent prigušenja je:

$$\zeta_h = \frac{C_t}{q_{rm}} \sqrt{\frac{B \cdot J_t}{V_t}} + \frac{b_m}{2q_{rm}} \sqrt{\frac{V_t}{B \cdot J_t}} \quad (3.32)$$

Iz jednadžbe (3.30) možemo dobiti sljedeće dvije prijenosne funkcije:

$$G_1(s) = \frac{\Theta_m(s)}{\omega_p(s)} = \frac{\frac{q_{rp}}{q_{rm}}}{s \left( \frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (3.33)$$

$$G_2(s) = \frac{\Theta_m(s)}{M_v(s)} = \frac{-\frac{C_t}{q_{rm}} \left( 1 + \frac{V_t}{B C_t} s \right)}{s \left( \frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (3.34)$$

Prijenosna funkcija  $G_1$  je najčešće upotrebljavani oblik koji se koristi pri projektiranju sustava.

## 4. SIMULACIJSKI MODEL

U današnje vrijeme, uporaba simulacijskih programskih paketa za modeliranje, simuliranje i optimiranje regulacijskih sustava postala je imperativ. Simulaciju možemo definirati kao umjetno stvorenu okolinu u kojoj oponašamo uvjete kakvi djeluju u stvarnosti. Razvoj računalne tehnologije i računalnih alata omogućio je jednostavno stvaranje simulacija realnih sustava, te uvelike olakšalo analizu sustava. Simulacija rada korištenog elektrohidrauličkog servo sustava je izvedena pomoću programskog paketa LabVIEW. To je grafički programski jezik koji sadrži veliki broj programskih paketa za razne namjene. Jedan od takvih paketa, koji se koriste za stvaranje simulacija, je 'Control Design & Simulation'. Taj paket se koristi za modeliranje, simuliranje i analizu dinamičkog ponašanja sustava koji mogu biti linearni ili nelinearni, te kontinuirani ili vremenski diskretni. Modeliranje izvodimo tako da već postojeće funkcije sadržane u 'Control Design & Simulation' slažemo u blok dijagramu te tako opisujemo matematički model sustava.

### 4.1. LabVIEW programski paket

LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) je programska razvojna aplikacija, slična mnogim razvojnim sustavima na bazi C, Basic ili NI LabWindows/CVI razvojnom sustavu. Ipak, LabVIEW se razlikuje od spomenutih aplikacija u jednom važnom pogledu. Drugi programski sustavi (izuzev VB -Visual Basic-a) koriste tekstualno bazirane jezike da bi generirale linije koda, dok LabVIEW koristi grafički programski jezik G, kako bi kreirao programe u obliku blok dijagrama.

Korisnik može koristiti LabVIEW sa malo programerskog iskustva. LabVIEW koristi terminologiju, ikone i ideje bliske znanstvenicima i inženjerima i oslanja se na grafičke simbole radije nego na tekstualni jezik da bi opisao programske akcije [7].

LabVIEW predstavlja vrlo moćan programski paket, pritom su izbjegnute sve teškoće i kompleksnosti koje ostali moderni software-ski paketi zahtijevaju. Omogućuje analizu ali i formiranje složenih inženjerskih sustava, dok se istovremeno može koristiti i za ozbiljna znanstvena istraživanja. Najčešće primjene su za dizajn, testiranje i implementaciju složenih sustava, sa procijenjenim smanjenjem vremena razvoja i povećanja produktivnosti.

LabVIEW uključuje konvencionalne programske razvojne alate, tako da korisnik koji razvija aplikaciju može postaviti točke loma (engl. Breakpoint - mjesta u programu gdje se njegovo izvršenje može zaustaviti i čekati na akciju korisnika), animaciju izvršenja programa da bi se vidjelo kako podaci prolaze kroz program i korak po korak izvršenje programa, sa ciljem da bi se olakšalo traženje i otklanjanje programskih grešaka kao i razvoj programa.

LabVIEW uključuje biblioteke funkcija i razvojnih alata specifično dizajniranih za upravljanje instrumentima. LabVIEW programi se nazivaju *virtualni instrumenti* (VI), jer njihov izgled i rad imitira stvarne instrumente. Ipak, ovi moduli su sa funkcijama konvencionalnih programskih jezika. VI-evi imaju i interaktivno korisničko sučelje i ekvivalent izvornom kodu, te prihvataju parametre od VI-eva na višem nivou.

Slijede opisi triju karakteristika VI-eva:

1. VI-evi sadrže jedno interaktivno korisničko sučelje, koje se naziva prednjom pločom (*front panel*) (Slika4.1). Prednja ploča može sadržavati kontrole, indikatore, grafove i druge kontrolne i indikacijske elemente. LabVIEW ima vrlo bogat izbor kontrola i indikatora (čak se može dizajnirati i vlastita kontrola ili indikator) i to omogućava široko područje mogućnosti programeru.

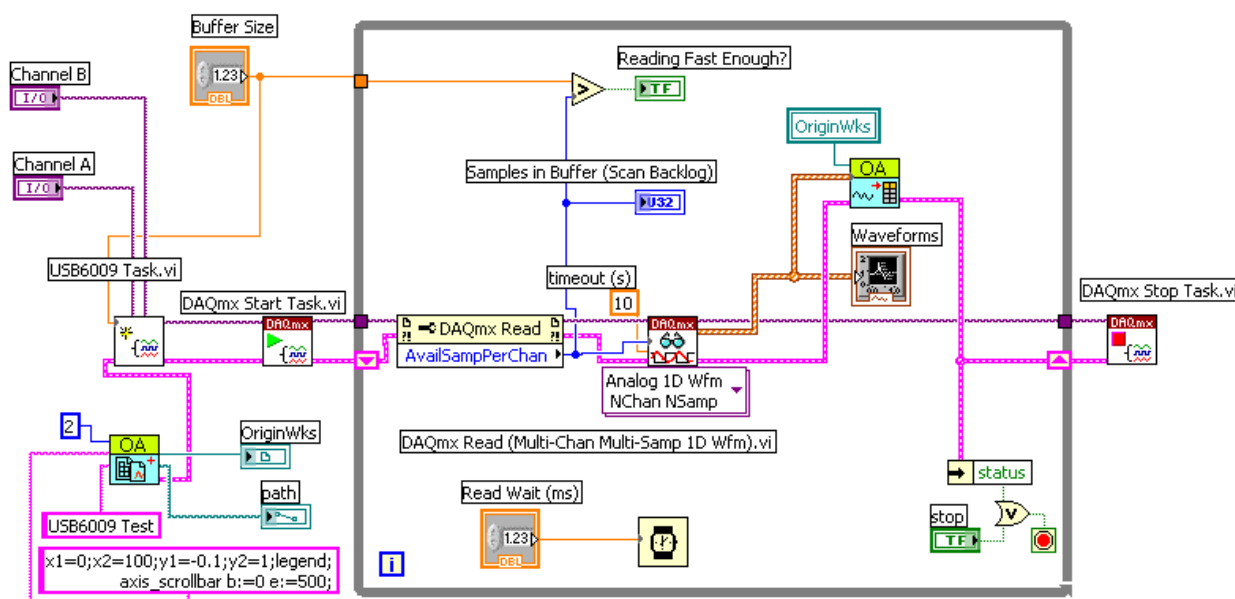


Slika 4.1 Primjer prednje ploče

Kontrole mogu imati mnoštvo oblika. Mnogi od tih oblika su virtualne slike realnih kontrola koje se koriste kod stvarnih instrumenata kao npr. rotirajući gumb. Ostali imaju digitalni koncept. Sve kontrole imaju neku vrstu vizualne informacije na osnovu koje korisnik uvijek zna u kojem se stanju nalaze. To jako pomaže jer se ne mora pri programiranju eksplicitno programirati i stanje pojedine kontrole. Drugo vrlo korisno svojstvo kontrola je to da se može odrediti njihova reakcija ukoliko je postavljena ulazna vrijednost nestabilna. U specifičnom slučaju, ukoliko ulazna kontrola može poprimiti samo cjelobrojne vrijednosti, u opsegu od 0 do 10 može se specificirati što se treba dogoditi ukoliko se unese ulazna vrijednost 3,5 ili -1 ili «nula» kao tekstualna naredba. Programski riješiti tu vrstu problema zahtijeva previše programerskog vremena tako da se ovom opcijom štedi na vremenu.

Indikatori, kao i kontrole, imaju mnoštvo različitih oblika. Neki od njih su preslika stvarnih indikatora (instrumenata i sl.), a neki su dizajnirani prikladnije za zaslon računala. Koncept indikatora uključuje grafove i prikaze što je druga važna ušteda u vremenu jer se ti pokazivački elementi ne moraju dizajnirati zasebno [8].

2. VI-evi primaju instrukcije iz *blok dijagrama* (Slika 4.2), koji korisnik gradi u G jeziku. Blok dijagram predstavlja pozadinu njegove prednje ploče koji prikazuje kako su sve kontrole i indikatori međusobno povezani kao i skrivene module gdje se odvija sva programska obrada podataka. Izgleda na neki način poput elektroničkog shematskog dijagrama i barem je konceptualno ožičen na isti način.



Slika 4.2 Primjer blok dijagrama

Takav prikaz često izgleda vrlo složen kao u elektroničkoj shemi stvarnog elektroničkog mjernog instrumenta. Stoga je jedno od najvažnijih svojstava u LabVIEW-u programiranju odrediti tajming i redoslijed operacija. U konvencionalnom programskom jeziku to je ostvareno redoslijedom naredbi i korištenjem različitih programskih petlji (For, While itd.). LabVIEW radi na potpuno isti način jedino što je način na koji se određuje redoslijed izvršenja naredbi profinjeniji.

Koncept koji koristi LabVIEW je *dataflow* – radnja se na nekom elementu izvršava kad su svi njegovi ulazi na raspolaganju. To znači paralelnost u izvršenju radnje (ili barem pseudoparalelizam). Uobičajeno izvršavanje radnji je s lijeva na desno jer su ulazi obično na lijevom dijelu elementa a izlazi na desnom dijelu. Međutim to nije zahtjev već samo stvar dogovora. Programske petlje i redoslijed kojim se realiziraju naredbe odvija se pomoću struktura koje izgledaju poput knjiga s brojevima stranica ili kao odsječci filmske trake.

3. VI-evi koriste hijerarhijsku i modularnu strukturu. Mogu se koristiti kao top-level programi (najgornjeg nivoa) ili kao podprogrami unutar drugih programa ili podprograma. VI unutar drugog VI se zove subVI (pod VI). *Ikona i konektorski panel* VI djeluju kao grafička parametarska lista tako da preko nje drugi VI-evi mogu prenijeti podatke u nju kao subVI.

Sa ovim karakteristikama, LabVIEW promovira i priklanja se konceptu modularnog programiranja. Dizajner dijeli aplikaciju u niz zadataka koje on može dalje dijeliti sve dok komplicirana aplikacija ne postane niz jednostavnih pod zadataka. Dizajner gradi VI da bi izvršio svaki pod zadatak a nakon toga kombinira ove VI-eve na drugom blok dijagramu da bi ostvario veći zadatak. Konačno, VI na najvišem nivou (top level) sadrži skup subVI-eva koji predstavljaju aplikacijske funkcije. Kako se svaki subVI može izvršiti sam za sebe, nezavisno od ostatka aplikacije, traženje grešaka u programu je mnogo lakše. Nadalje, mnogi subVI niskog nivoa često izvršavaju zadatak koji je zajednički za više aplikacija, tako da se može razviti specijalizirani skup subVI-eva pogodan za aplikacije koje dizajner namjerava razviti.



## 4.2. Izrada simulacije

U tablici 1 dani su parametri simulacije potrebni za izradu simulacijskog modela.

**Tablica 1. Parametri simulacijskog modela**

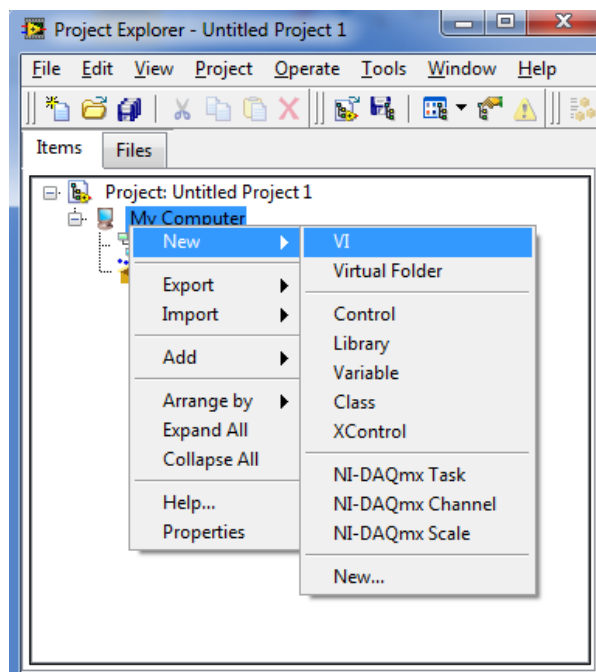
Simbol	Parametar	Vrijednost
$K_{ps}$	Koeficijent pojačanja pogonskog sklopa	150 [okr/V]
$T_{ps}$	Vremenska konstanta pogonskog skopa	0.01 [s]
$q_{ip}$	Specifični protok crpke	$7.8 \cdot 10^{-7}$ [m <sup>3</sup> /rad]
$q_{im}$	Specifični protok hidromotora	$13.05 \cdot 10^{-7}$ [m <sup>3</sup> /rad]
$C_t$	Ukupni koeficijent istjecanja	$2.4672 \cdot 10^{-12}$ [m <sup>4</sup> /kg s]
$\omega_h$	Neprigušena vlastita frekvencija	351.75 [rad/s]
$\zeta_h$	Koeficijent prigušenja hidromotora	2.4
$V_0$	Poluvolumen hidromotora	$4.1 \cdot 10^{-6}$ [m <sup>3</sup> ]
$B$	Modul stišljivosti fluida	$1400 \cdot 10^6$ [Pa]
$J_t$	Moment inercije tereta	0.0047 [kg m <sup>2</sup> ]
$b_m$	Koeficijent prigušenja tereta	0.012 [Ns/m]

Primjenom navedenih parametara modela sustava (Tablica 1.) provedena je simulacija u LabVIEW-u i pokazani su odzivi karakterističnih veličina sustava. Pokretanjem LabVIEW-a odabiremo novi projekt (Empty project) (Slika 4.3).



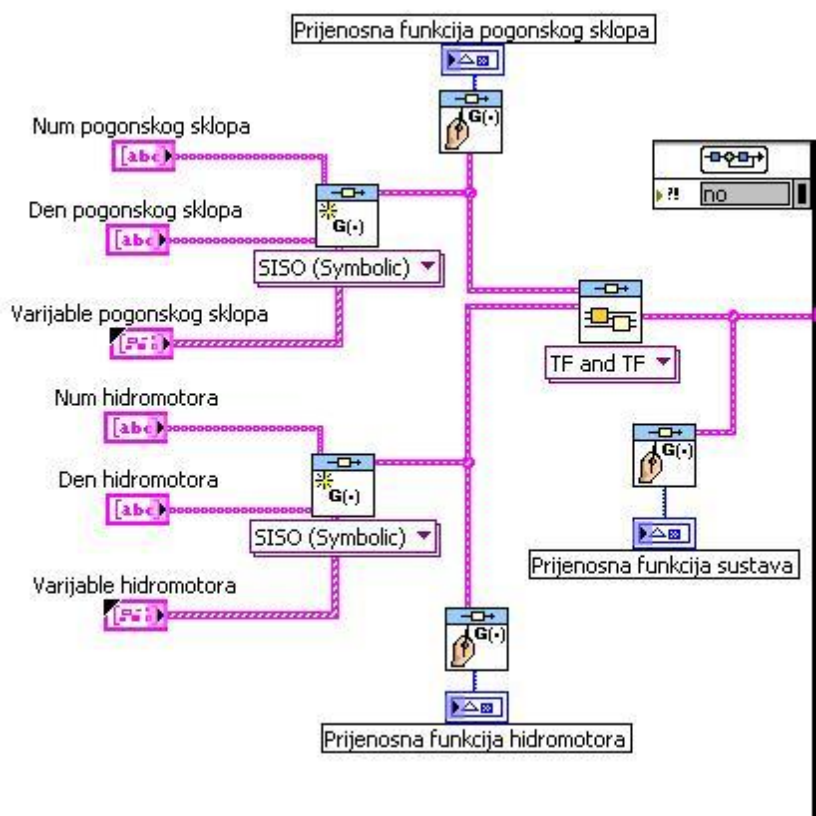
**Slika 4.3 Početni izbornik LabVIEW-a**

Odabirom novog projekta otvara nam se novi prozor gdje odabiremo novi VI, što nam otvara grafičko sučelje i blok dijagram (Slika 4.4).

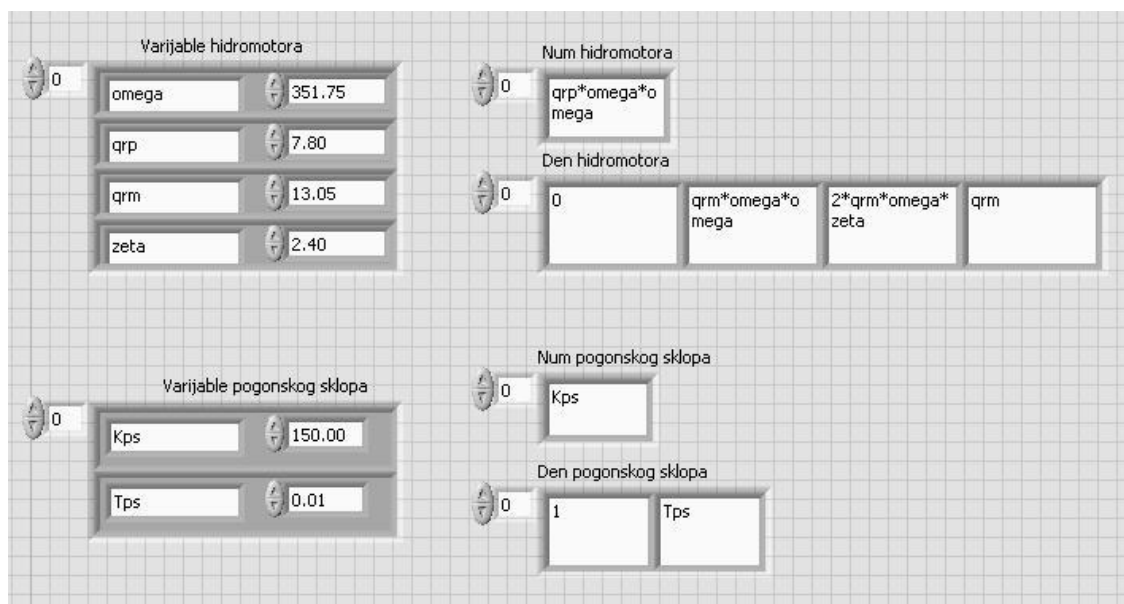


**Slika 4.4** Izbornik projekta

Nakon otvaranja prednje ploče i blok dijagrama, u blok dijagramu možemo početi sa kreiranjem prijenosne funkcije regulacijskog sustava (Slika 4.5). Najprije pomoću funkcije 'CD Construct Transfer Function Modul' izvodimo prijenosnu funkciju pogonskog sklopa te spajanjem 'Num pogonskog sklopa', 'Den pogonskog sklopa' i 'Varijable pogonskog sklopa' na modul za prijenosnu funkciju na prednjoj ploči se otvaraju prozori istih naziva. U te prozore upisujemo varijable prijenosne funkcije pogonskog sklopa, te njihove ovisnosti u 'Num pogonskog sklopa' i 'Den pogonskog sklopa'. Zatim na isti način postavljamo prijenosnu funkciju hidromotora te dodajemo i prikaz ukupne prijenosne funkcije sustava (Slika 4.6).

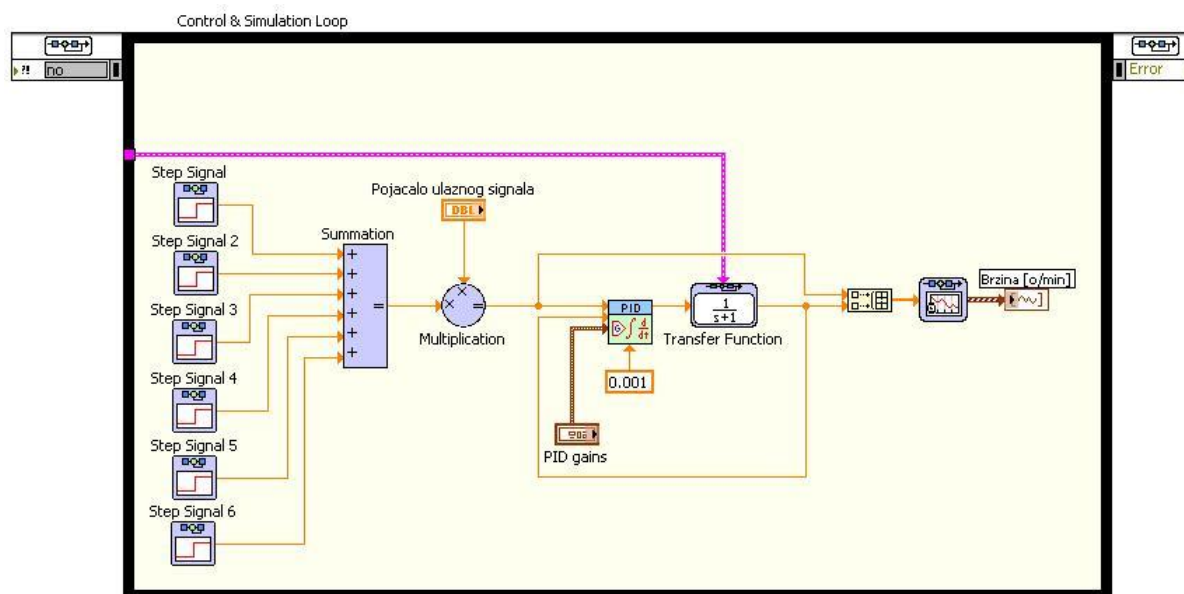


Slika 4.5 Blok dijagram prijenosne funkcije

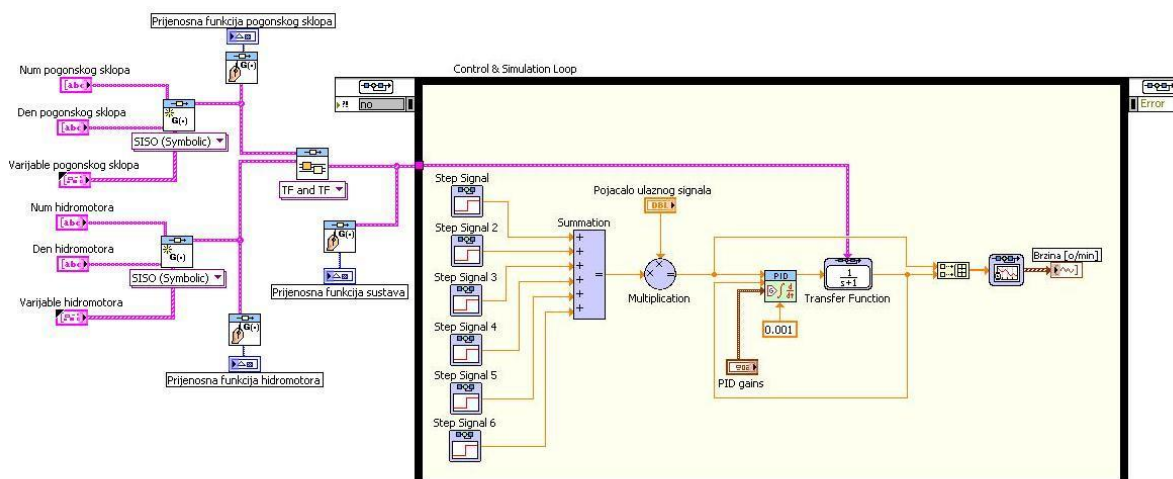


Slika 4.6 Parametri prijenosne funkcije

Dobivene prijenosne funkcije pogonskog sklopa i hidromotora množimo te dobivenu prijenosnu funkciju sustava uvodimo u simulacijsku petlju u funkciju 'Transfer Function' (Slika 4.7). Ulazni signal generiramo pomoću šest zbrojenih Step funkcija. Ulazne signale množimo sa faktorom pojačanja ulaznog signala koji nam omogućuje da kontroliramo veličinu referentne brzine koju želimo regulirati u simulacijskoj petlji.

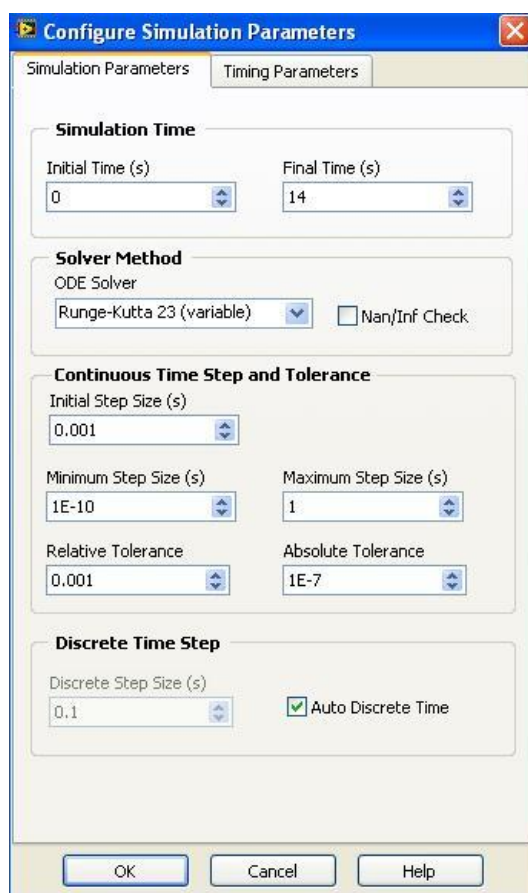


Slika 4.7 Simulacijska petlja



Slika 4.8 Blok dijagram simulacije sustava

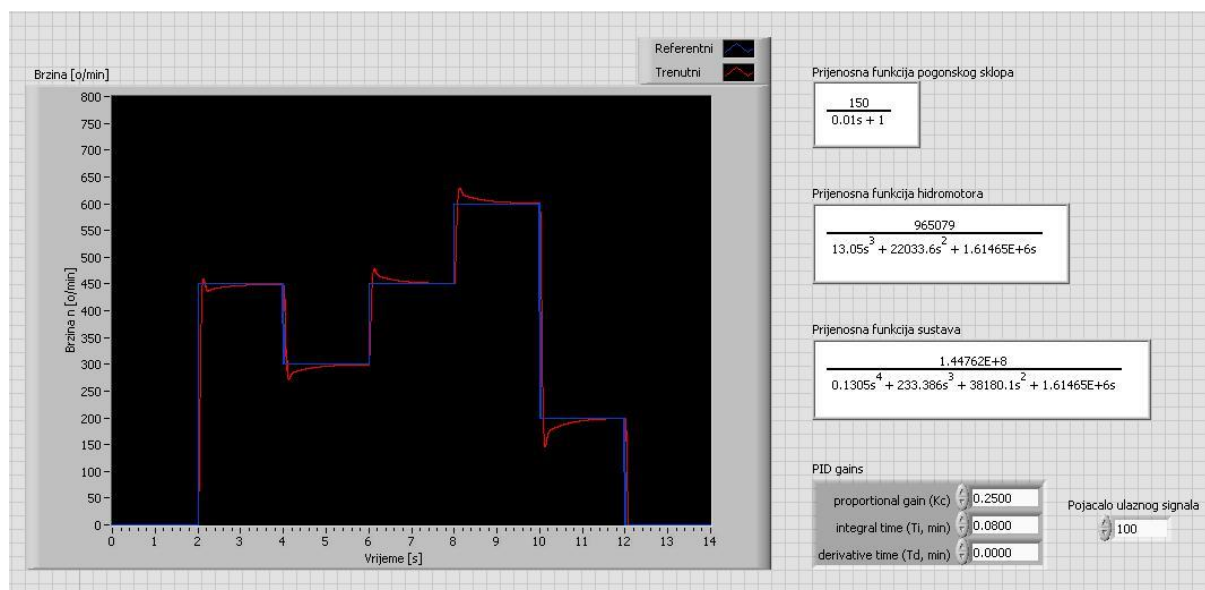
Prije pokretanja simulacije moramo namjestiti parametre simulacije. Na granicu simulacijske petlje blok dijagrama desnim klikom miša bismo 'Configure Simulation Parameters'. Namještamo 'Final time' na 14 sekundi, 'ODE Solver' na 'Runge-Kutta 23(variable)', i 'Step Size' na 0.001 sekundu (Slika 4.9).



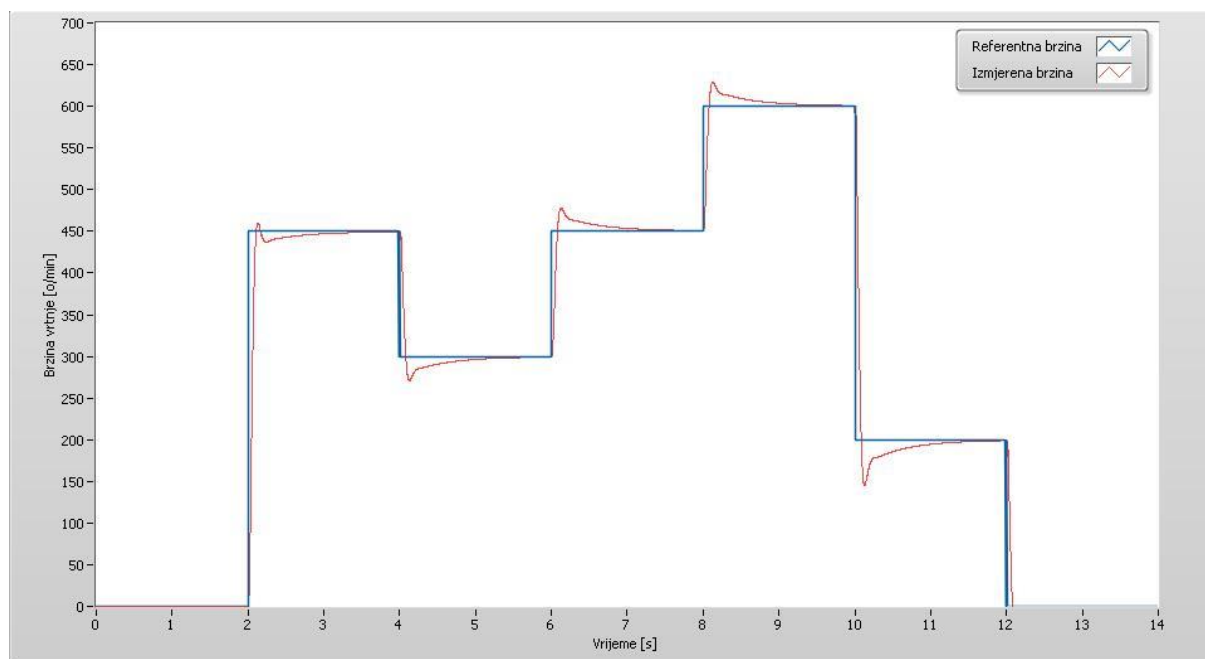
Slika 4.9 Parametri simulacijske petlje

Na grafovima postavljamo 'Chart History Length' na 500000. 'Chart History Length' predstavlja broj valnih oblika koje će graf zadržati u memoriji, ako je broj premali graf će izbrisati početne rezultate.

Za upravljanje brzine vrtnje hidrauličkog sustava korišten je PI-regulator. Pojačanje regulatora određeno je metodom pokušaja i pogrešaka. Pojačanje regulatora  $K_c$  namjestimo na 0.25, a integralno vrijeme  $T_i$  postavljamo na 0.08. Dobiveni su zadovoljavajući rezultati, koji su prikazani zajedno sa parametrima regulatora na slikama 4.10-4.11.



Slika 4.10 Grafičko sučelje simulacijskog modela

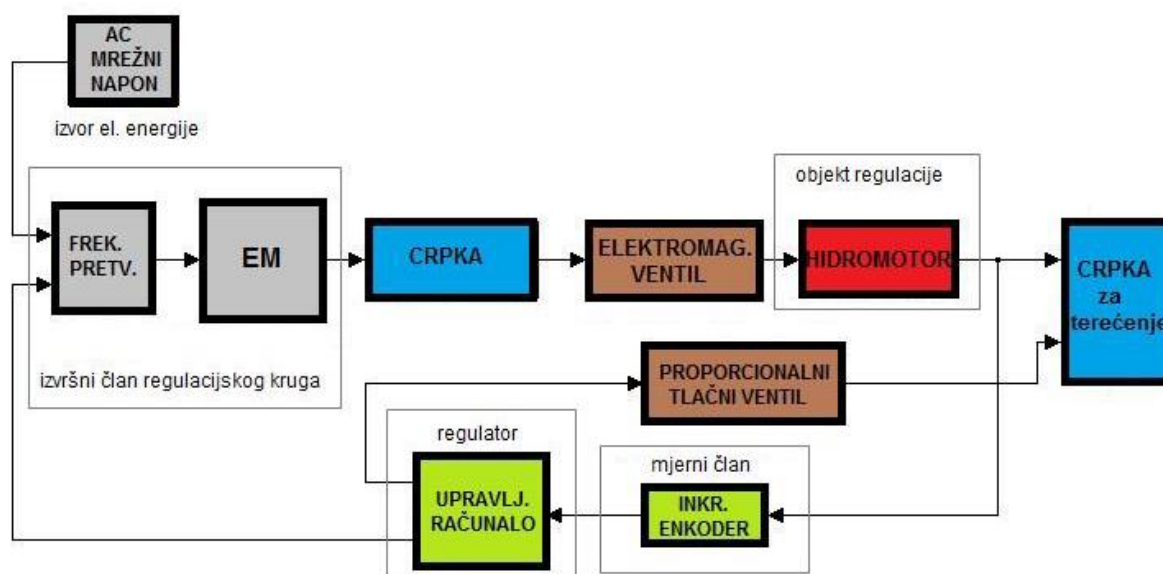


Slika 4.11 Odziv simulacijskog sustava

## 5. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE

U ovom poglavlju dan je opis izrade upravljačkog programa i prikazani su eksperimentalni rezultati ispitivanja.

Eksperimentalni modul za regulaciju brzine vrtnje hidromotora izradila je tvrtka HIKON, a nalazi se u laboratoriju za automatizaciju i robotiku A-307 (Fakultet strojarstva i brodogradnje, sjeverna zgrada). Zadatak ovog rada bio je provesti regulaciju brzine vrtnje hidromotora na principu promjene protoka radnog fluida. Upravljanje je ostvareno prijenosnim računalom pomoću programskog paketa LabVIEW kojim se preko upravljačkog uređaja CompactRIO šalje upravljačke signale na frekvencijski pretvarač i proporcionalni ventil. Principijelna blok shema sustava je dana na slici 5.1.

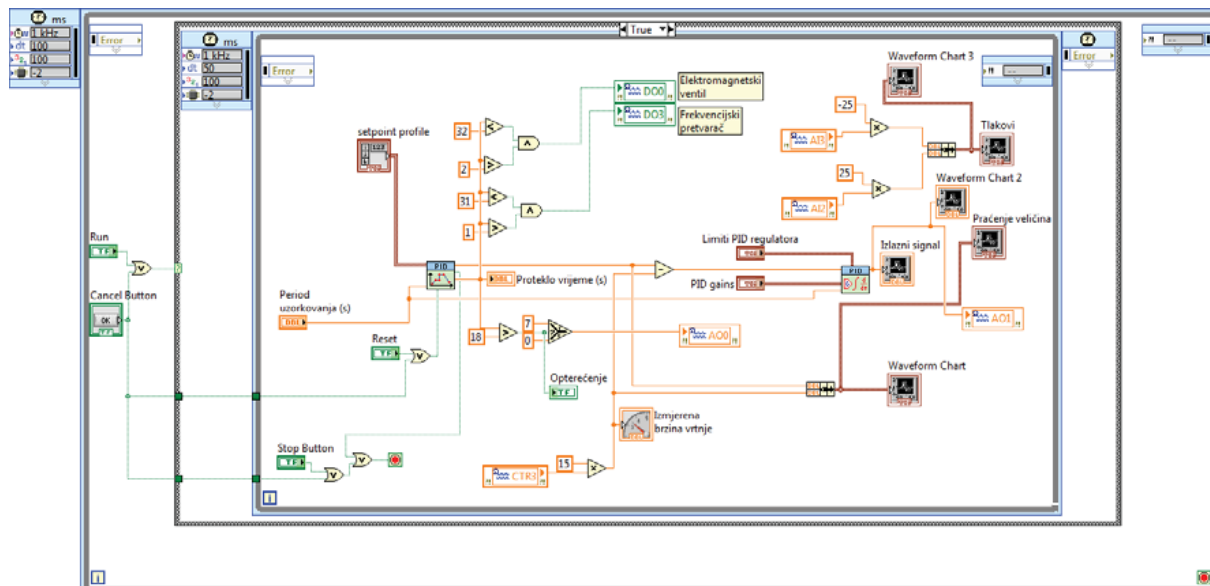


Slika 5.1 Principijelna blok shema sustava

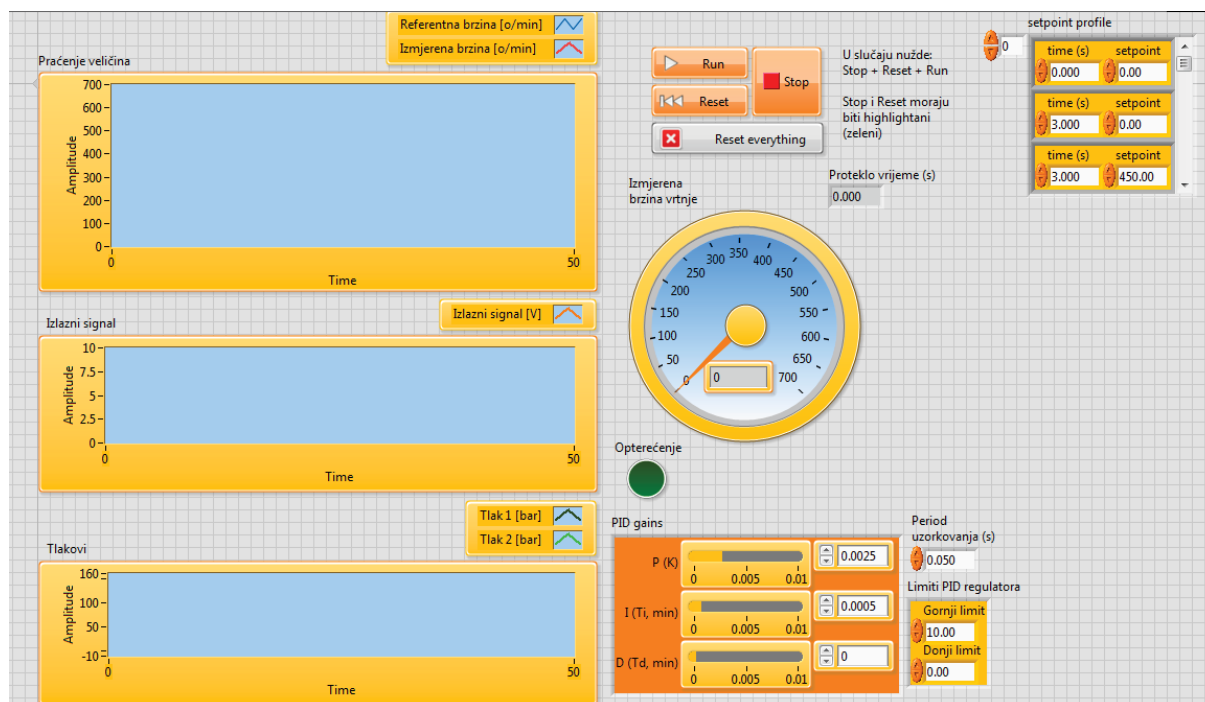


### 5.1. Izrada upravljačkog programa

Izrada upravljačkog programa se sastoji od izrade blok dijagrama (Slika 5.2) i izrade grafičkog korisničkog sučelja (Slika 5.3).



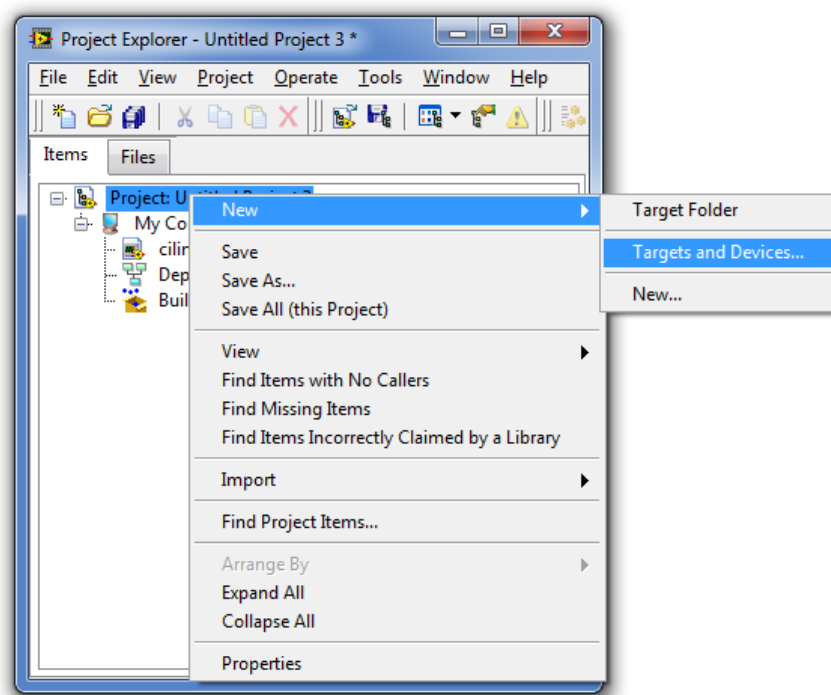
**Slika 5.2** Blok dijagram upravljačkog programa



**Slika 5.3** Korisničko sučelje upravljačkog programa



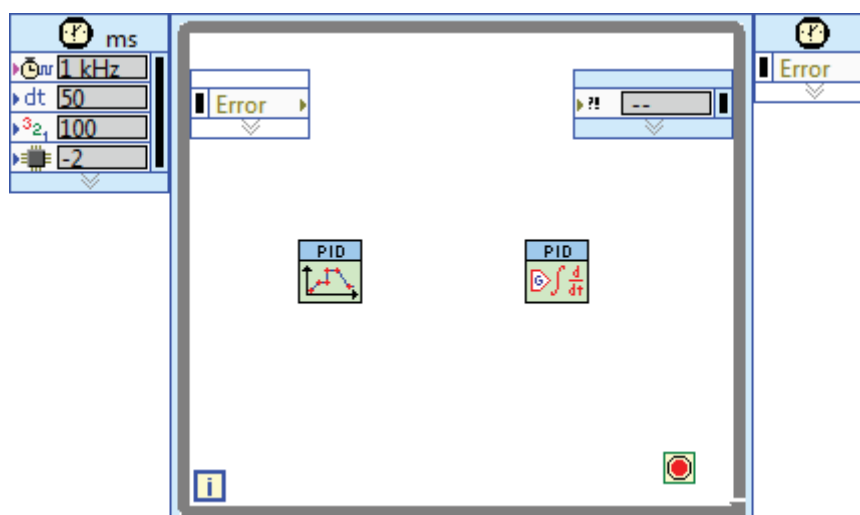
Da bi se upravljački programi mogli izvoditi na uređaju CompactRIO potrebno je kreirati LabVIEW projekt unutar kojeg konfiguriramo postavke samog uređaja. Preduvjet za definiranje LabVIEW projekta je povezivanje CompactRIO uređaja sa računalom putem Ethernet kabela. Zatim je potrebno definirati IP adresu CompactRIO. To se radi u Measurement & Automation Exploreru. Nakon toga otvaramo novi projekt u LabVIEW-u i pomoću New→Targets and Devices dodajemo CompactRIO u projekt (Slika 5.4).



**Slika 5.4 Dodavanje upravljačkog uređaja CompactRIO**

Nakon što je CompactRIO detektiran, potrebno je odabrati njegov način rada. Za to koristimo Scan Interface mode koji automatski detektira I/O module spojene na CompactRIO i postavlja ih u LabVIEW projekt.

Da bi krenuli sa izradom programa potrebno je na ikoni cRIO9076 pod stavkom 'New' odabrati VI. Prvo odabiremo strukturu u kojoj ćemo realizirati programski kod. Za to odabiremo vremenski definiranu petlju (eng. Time Loop) jer u takvom tipu petlje Real-time sustavi izvršavaju kod.



**Slika 5.5 Vremenska While petlja s PID blokovima**

Zatim počinjemo sa postavljanjem elemenata u regulacijsku petlju. Prvo dodajemo dva PID bloka, prvi nam služi za generiranje reference, a drugi predstavlja PID regulator (Slika 5.5). Ulazni parametri prvog bloka su: referentne brzine i vremena aktivacije (Setpoint profile), period uzrokovanja i Reset tipka. Izlazni parametri su: generirana vrijednost referentne brzine u realnom vremenu, proteklo vrijeme i signal koji nam označuje kada je isteklo vrijeme definirano u Setpoint profile. Ulazni parametri drugog bloka su: parametri regulatora (PID gains), limiti PID regulatora, period uzrokovanja i iznos referentne vrijednosti umanjen za izmjerenu vrijednost. Izlazni parametar je napon koji se šalje na ulaz servo ventila.

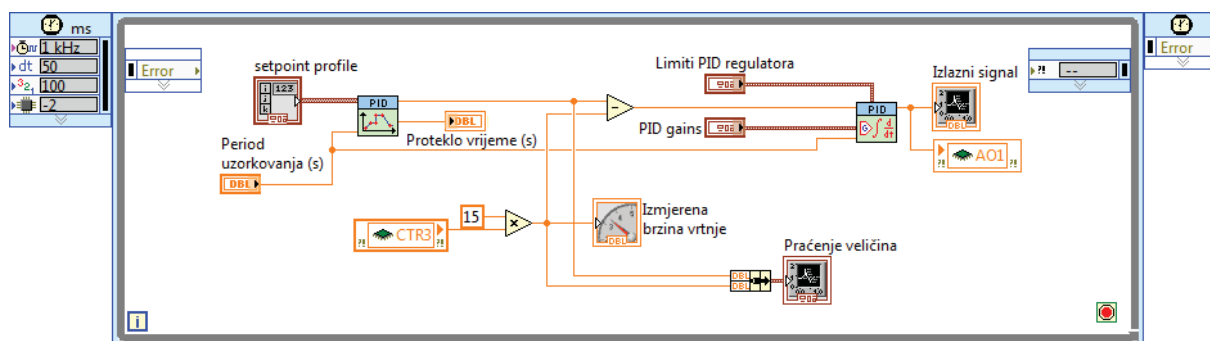
Nakon što smo spojili ulazne i izlazne parametre PID blokova, potrebno je iz projekta prebaciti ikone AO1 i CTR3. Ikona analognog izlaza AO1 se spaja na izlaz iz PID regulatora na koji također spajamo i grafički prikaz (Izlazni signal) kako bi ga mogli prikazati u ovisnosti o vremenu. Preko ulaza CTR3 sa CompactRIO uređaja dolazi signal sa informacijom o brzini vrtnje hidromotora. S obzirom da CompactRIO broj impulsa pretvara u frekvenciju i da je u brojaču broj uzoraka po okretaju namješten na 1000, potrebno je tu frekvenciju pomnožiti sa 15 da bi dobili brzinu vrtnje u o/min. Referentnu i izmjerenu brzinu vrtnje pratimo preko grafa 'Praćenje veličina'. Nakon toga je potrebno još zadati referentne vrijednosti brzine vrtnje i vremena (Tablica 2). S time je gotova regulacijska petlja (Slika 5.6). Definirani parametri regulatora dani su u tablici 3.

Tablica 2. Referentne vrijednosti brzine vrtnje i vremena

Vrijeme (s)	Brzina vrtnje (okr/min)
0	0
3	0
3	450
6	450
6	300
9	300
9	450
12	450
12	600
15	600
15	200
18	200
18	450
21	450
21	300
24	300
24	450
27	450
27	600
30	600
30	0
33	0

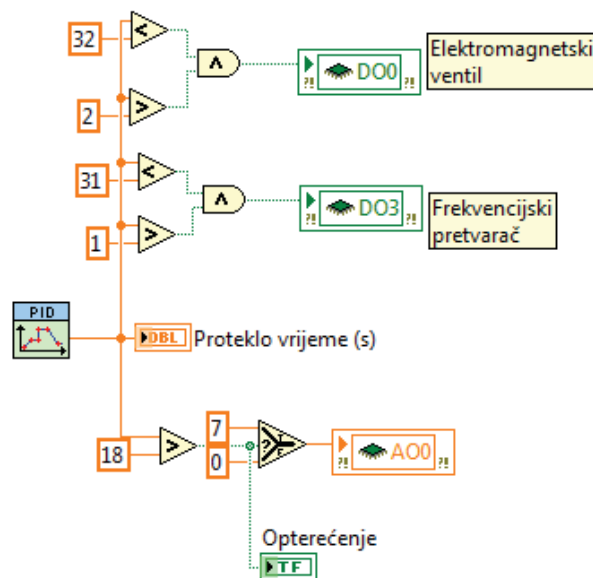
Tablica 3. Parametri regulatora

Parametar regulatora	Vrijednost
P (K)	0.0025
I ( $T_i$ , min)	0.0005
D ( $T_d$ , min)	0



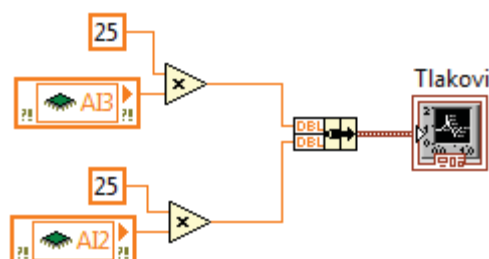
Slika 5.6 Regulacijska petlja

Nakon toga sljedi dodavanje vremenskih ograničenja. Ona su: vrijeme aktiviranja frekvencijskog pretvarača (1. sekunda), vrijeme aktiviranja elektromagnetskog ventila (2. sekunda), vrijeme uključivanja opterećenja (18. sekunda), vrijeme isključivanja frekvencijskog pretvarača (31. sekunda) i vrijeme isključivanja elektromagnetskog ventila (32. sekunda). Elektromagnetskom ventilu pripada digitalni izlaz DO0, frekvencijskom pretvaraču digitalni izlaz DO3, a proporcionalnom ventilu analogni izlaz AO0 (kada se uključi teret, na ulazu ventila imamo napon od 7 V), Slika 5.7.



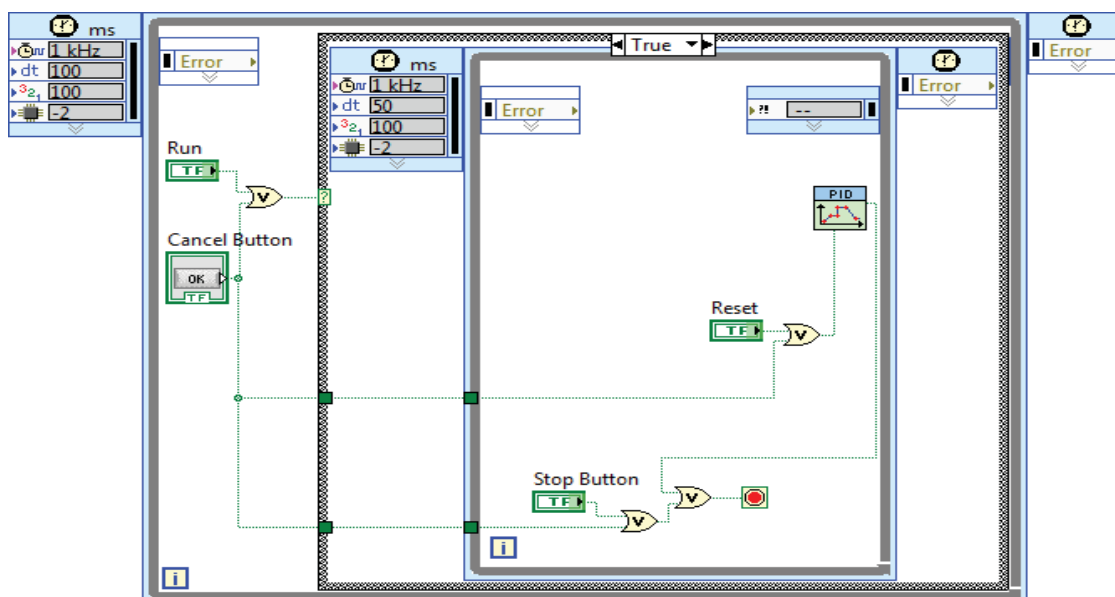
Slika 5.7 Dodavanje vremenskih ograničenja

Sljedeće dodajemo prikaz ovisnosti tlakova o opterećenju (Slika 5.8). Izlazi senzora su spojeni na analogne ulaze AI2 i AI3. Zato što senzori mjere tlakove od 0 do 250 bar, a izlazni napon im je 0 do 10 V, potrebno je iznos napona sa senzora pomnožiti sa 25.



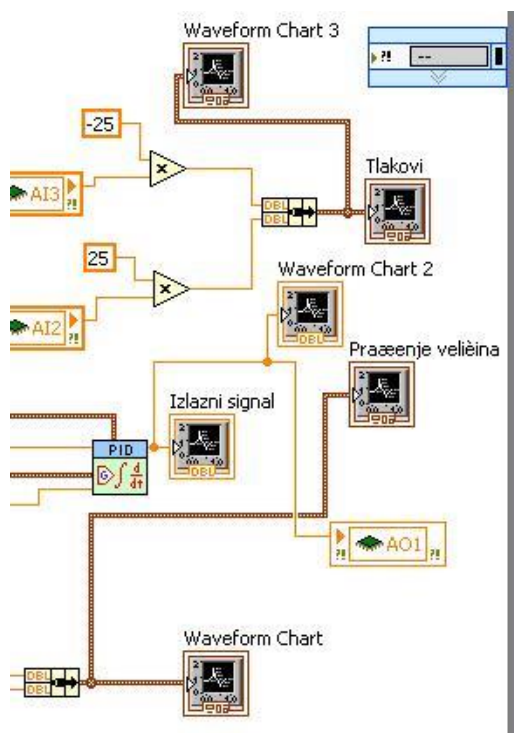
**Slika 5.8 Spajanje senzora tlaka**

Zatim izrađujemo sučelje preko tipki koje korisniku omogućuju aktiviranje i deaktiviranje različitih razina koda (Slika 5.9). Pomoću tipke 'Run' pokreće se cijeli program. Kada je tipka 'Run' pritisnuta, 'Case structure', odnosno 'If' petlja se nalazi u stanju 'True' u kojem je cijeli kod. U stanju petlje 'False' se ne nalazi ništa i ne izvršava se nikakav kod. Tipkom 'Stop' zaustavlja se unutarnja vremenska petlja što znači da ponovnim pritiskom tipke 'Run' se nastavlja izvođenje programa. Tipkom 'Reset', resetiramo blok za generiranje referenci koji se onda vraća na početne vrijednosti pa se u tom slučaju ponovim pritiskom tipke 'Run' program pokreće iz početka. I naposljetku, tipkom 'Cancel button', koja je u grafičkom sučelju označena kao 'Reset everything', program se trenutno zaustavlja, resetira i isključuje sve izlaze koji su ostali uključeni. Ta tipka je postavljena kao sigurnosna tipka ako dođe do nekih nepredviđenih situacija ili da se isključe svi izlazi koji su slučajno ostali uključeni nakon što je program završio s izvođenjem.



Slika 5.9 Dodavanje tipki za aktiviranje i deaktiviranje različitih razina kôda

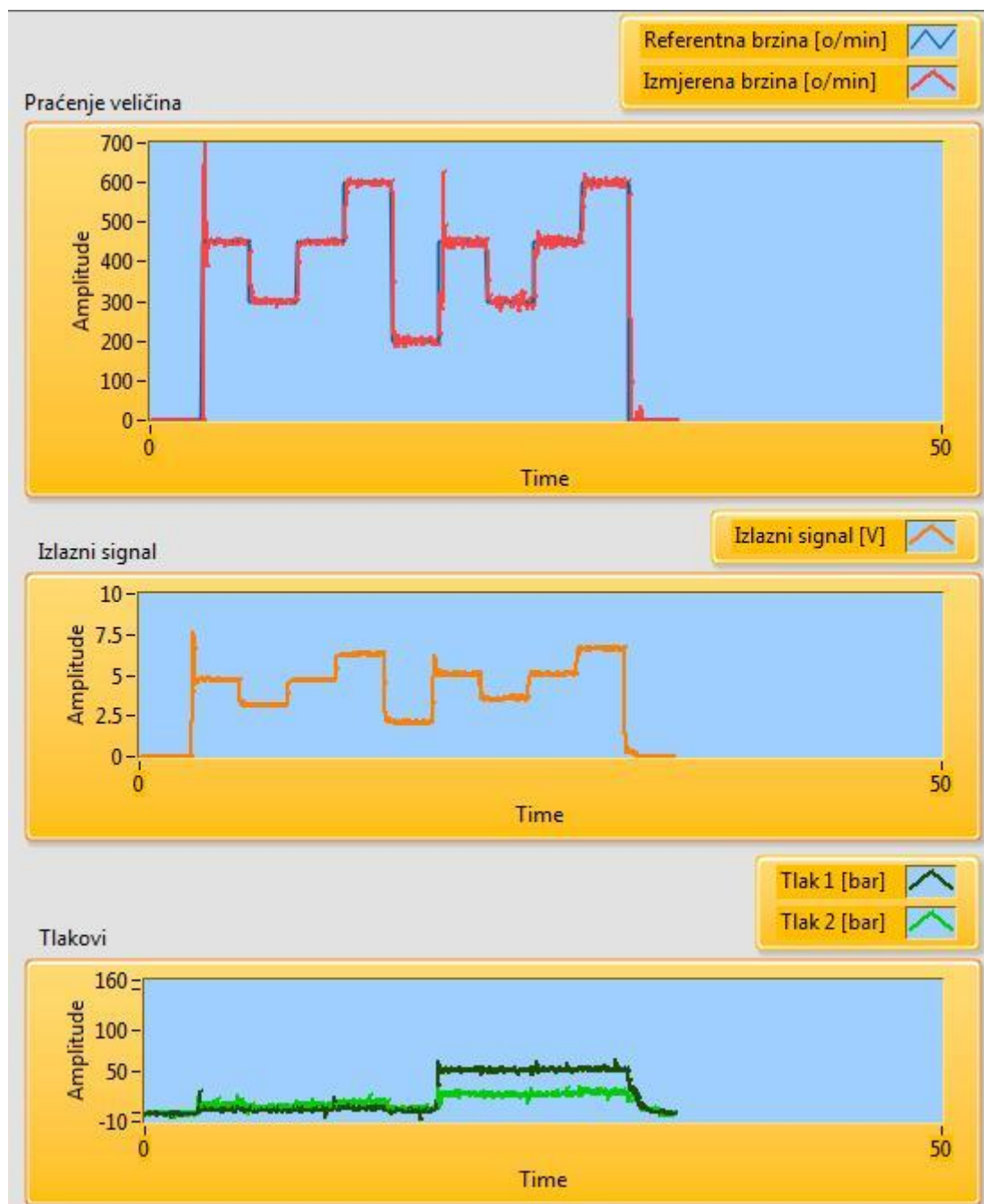
I na kraju, s obzirom da su grafovi na korisničkom sučelju relativno mali, ugrađujemo dodatne grafove (Waveform Chart) za vidljiviji prikaz rezultata (Slika 5.10). Oni su postavljeni lijevo od korisničkog sučelja, pa je potrebno pomaknuti radno područje ulijevo da bi bili vidljivi.



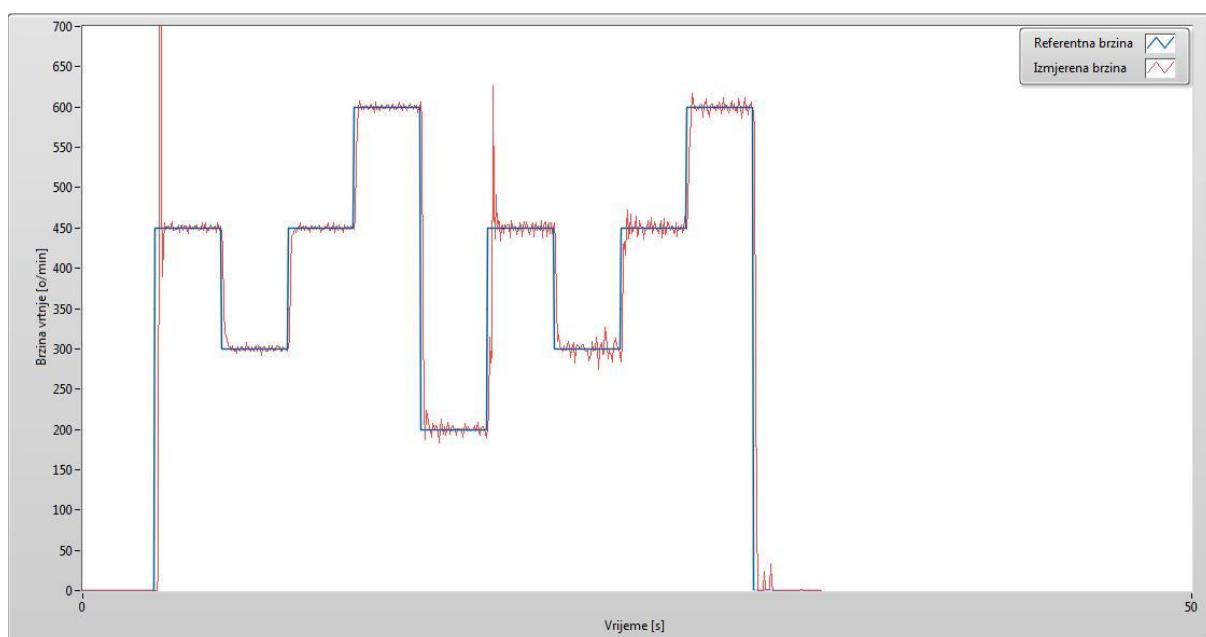
Slika 5.10 Dodatni grafovi

## 5.2. Eksperimentalni rezultati

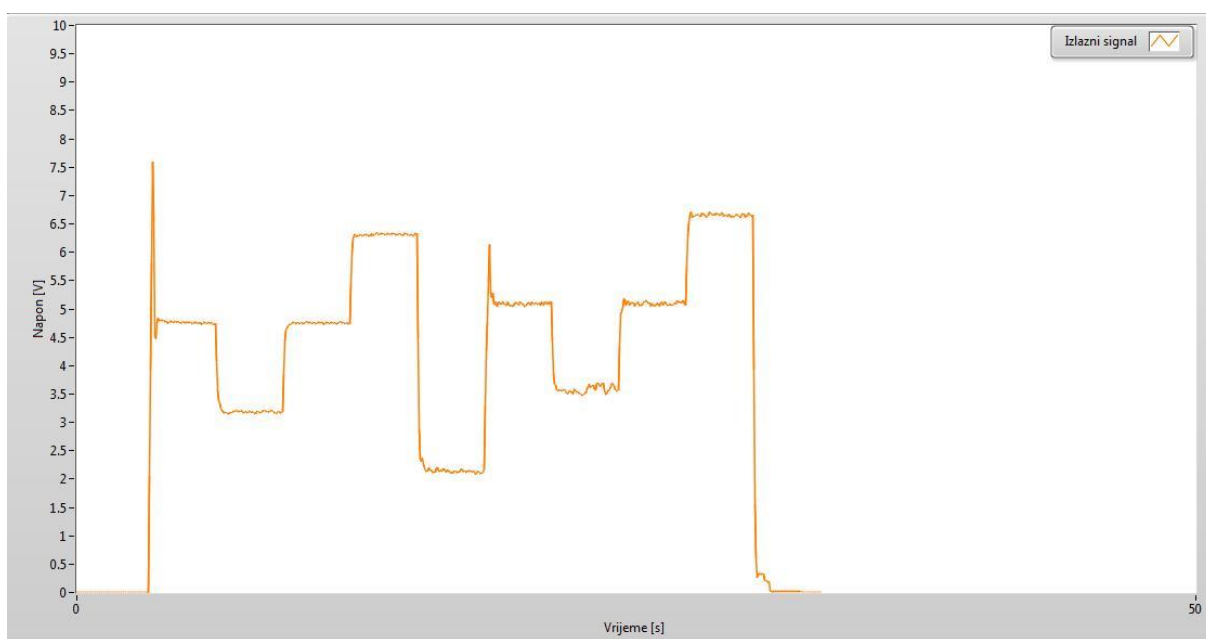
U ovom poglavlju dani su grafički prikazi dobivenih rezultata ekperimentalnog ispitivanja za regulaciju brzine vrtnje hidromotora na principu promjene količine protoka radnog fluida. Vidljivo je da, uz početni prebačaj i oscilacije, izmjereni signal dobro prati referencu (Slika 5.11 i 5.12). Uključenjem opterećenja, oscilacije se dodatno povećavaju. Također je vidljiva promjena tlakova nakon uključenja tereta (Slika 5.13 i 5.14).



Slika 5.11 Grafičko sučelje s odzivima

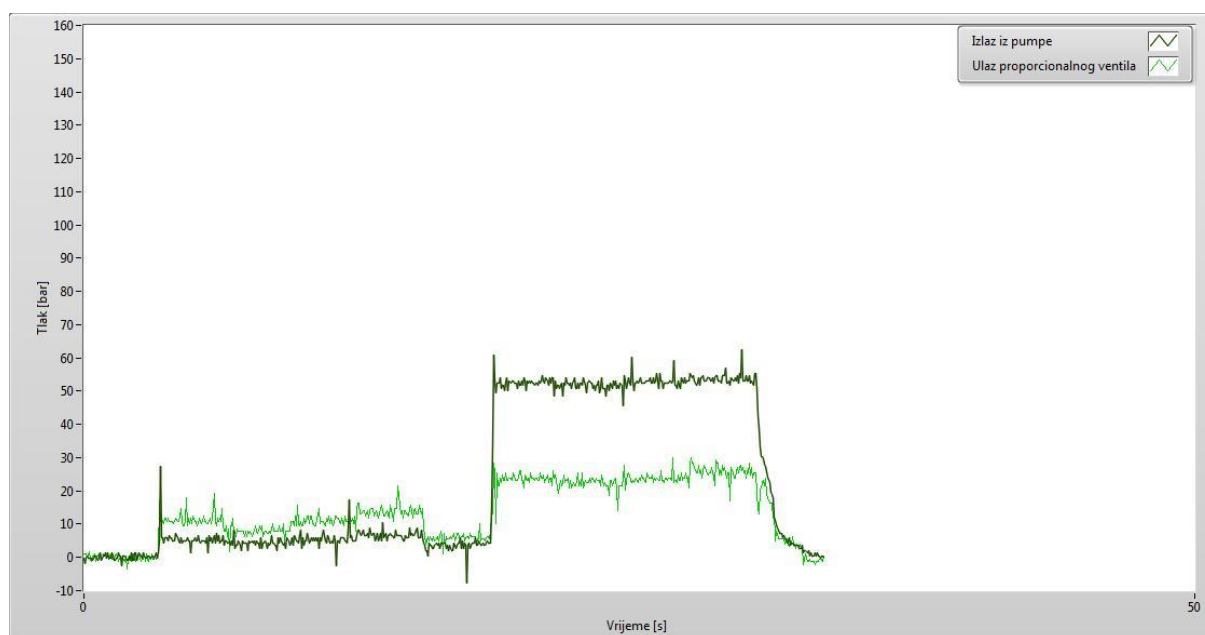


Slika 5.12 Odziv brzine vrtnje



Slika 5.13 Izlazni signal iz regulatora





**Slika 5.14** Ponašanje tlakova u ovisnosti o opterećenju

## 6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bila je regulacija brzine vrtnje hidrauličkog motora na principu promjene količine protoka radnog fluida u programskom paketu LabVIEW i pomoću upravljačkog uređaja CompactRIO. Iako su na eksperimentalnom postavu hidromotora moguća dva načina regulacije brzine vrtnje, u ovom radu je napravljen eksperiment samo za jedan način.

Kod ovog principa regulacije koristi se elektromotor upravljan frekvencijskim pretvaračem. Upotreba frekvencijskih pretvarača kod upravljanja elektro-hidrauličkih servo sustava je relativno nova i prvi put je zabilježena početkom 90-ih godina, te se svakako nameće kao novi pravac razvoja u razvoju industrijskih servo pogona. Zadnje desetljeće mnogo se truda ulaže u poboljšanja i unaprijeđenje frekvencijskih pretvarača i njihovih mogućnosti, pa su uz svoju sve nižu cijenu postali sve češći u industrijskoj uporabi.

Kao upravljački uređaj u eksperimentu je korišten CompactRIO. Za razliku od PLC uređaja pomoću kojih rješavanje ovakvih zadataka može biti veoma komplicirano, programiranje CompactRIO-a je vrlo jednostavno. Za to se koristimo grafičkim programskim paketom LabVIEW koji je relativno jednostavan za uporabu, čak i bez velikog programerskog predznanja. LabVIEW također sadrži i jednostavno i pregledno korisničko sučelje koje prikazuje rezultate u realnom vremenu.

Eksperimentalni rezultati pokazuju lagane oscilacije uz početni preskok koji bi se mogli smanjiti podešavanjem parametara regulatora ukoliko bi se izvodio samo ovaj princip regulacije. Odziv usporava inercija pogonskog elektromotora ali je usprkos tome relativno brz. Ovaj način regulacije omogućuje bolji stupanj iskoristivosti sustava, a time u uštedu energije, pa se zato i sve više koristi u primjeni.

## LITERATURA

- [1] Abdulji, R., Ciner, P.: Elektrohidraulički servosistemi, Vojno izdavački i novinski centar, Beograd, 1986.
- [2] Šitum, Ž.: Upravljanje elektrohidrauličkih servosustava za translacijsko pozicioniranje, magistarski rad, FSB, Zagreb, 1997.
- [3] Nikolić, G., Novaković, J.: Pneumatika i hidraulika, Školske novine, Zagreb, 1998.
- [4] National Instruments: cRIO-9075/9076 Operating Instructions and Specifications, National Instruments Corporation, Austin, Texas, 2011.
- [5] Wu, H. W., Lee, C. B.: Influence of a relief valve on the performance of a pump/inverter controlled hydraulic motor system, Mechatronics Vol. 6, No. 1, pp 1-19, 1996.
- [6] Merritt, H. E.: Hydraulic control systems, John Wiley & Sons Inc., New York, 1967.
- [7] Salihbegović, A.: Specijalna mjerenja, ETF Sarajevo, 2003.
- [8] Mileta, D.: Virtualna instrumentacija, skripta, 2005.
- [9] Razum, L.: Regulacija sile i položaja cilindra hidrauličke preše, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2012.
- [10] Žinić, D.: Regulacija brzine vrtnje hidrauličkog motora pomoću upravljačkog uređaja CompactRIO, Završni rad, FSB, Zagreb, 2013.